

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane (w. Boumerdes) .

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0035-17

APA Citation (APA توثيق):

Khenter, Karima (2017). Vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane (w. Boumerdes)[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بنمّين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، دوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE L'HYDRAULIQUE-ARBAOUI Abdallah-

DÉPARTEMENT HYDRAULIQUE URBAINE

MÉMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en hydraulique

Option : Conception des systèmes d'assainissement

INTITULÉ :

**VULNÉRABILITE MULTIFACTORIELLE À L'ÉROSION
HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT DU BARRAGE DE
BÉNI AMRANE (W. BOUMERDÈS)**

Présenté par :

M^{lle} : KHENTER Karima

DEVANT LES MEMBRES DU JURY

Nom et prénom	Grade	Qualité
M^{me} MEDDI Hind	M.C.A	Présidente
M. AMMARI Abdelhadi	M.C.B	Membre
M. BOUFEKANE Abdelmadjid	M.A.A	Membre
M^{me} HOULI Samia	M.A.A	Membre
M^{me} BERBACHE Sabah	M.A.A	Promotrice

Session mai ; 2017

Remerciements

Je veux exprimer par ces quelques lignes de remerciements ma gratitude envers tous ceux en qui par leur présence, leur soutien, leur disponibilité et leurs conseils, j'ai eu le courage d'accomplir ce mémoire.

Je tiens à remercier en premier lieu, le corps professoral et administratif de l'école nationale supérieure de l'hydraulique, pour leur dévouement à améliorer la qualité de notre formation.

Je tiens à remercier ma promotrice M^{me} BERBACHE qui a proposé le thème de ce mémoire.

Je tiens d'autre part à remercier les membres de Jury pour bien vouloir m'accorder de leurs temps pour commenter, discuter et juger mon travail.

Pour finir, je remercie tout de même mes parents en particulier pour m'avoir permis de poursuivre mes études et pour leur soutien.

Dédicaces

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,

L'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que

Je dédie ce Mémoire ...

À mes chers parents

À mes chers sœurs et frères

À la mémoire de mes grands-pères

À mes grand-mères

ET à tous ceux qui me sont chers.

ملخص:

الحت المائي للتربة، عملية طبيعية تتسارع بتدخل الإنسان، هي واحدة من المشاكل البيئية الخطيرة في شمال الجزائر. تؤثر هذه الظاهرة على جزء كبير من الأراضي الشمالية للوطن غير أنّ المعطيات والخرائط التقليدية المتوفرة حاليا بالية ولم تعد توفر الموضوعية لتقييم هذه الظاهرة ككل والتصرف في الوقت المناسب.

يتمثل هذا العمل في إعداد قاعدة معطيات رقمية، بواسطة نظام المعلومات الجغرافية، حول قابلية التأثر المتعدد العوامل للحت المائي للحوض المنحدر لسد بني عمران (شمال وسط الجزائر) وهذا من خلال إنشاء العديد من طبقات المعلومات (نوع التربة، الانحدار، تهطل الأمطار واستغلال الأراضي) للوصول إلى تصنيف مختلف مناطق الحوض، في خريطة نظرية، حسب درجة الحساسية للحت المائي. تعد هذه الخرائط وسيلة لمساعدة واضعي السياسات في التسيير الأمثل للموارد المائية والتربة وكذا لحماية سد بني عمران من ترسب الطمي.

كلمات مفتاحية: الحت المائي، الحساسية، نظام المعلومات الجغرافية، الحوض المنحدر لسد بني عمران.

Résumé :

L'érosion hydrique des sols, processus naturel accéléré par l'Homme, est l'un des graves problèmes environnementaux en Algérie Septentrionale. Ce phénomène affecte une large partie des terres du Nord du pays. Les données cartographiques classiques disponibles actuellement, sont très anciennes et ne permettent plus de visionner le phénomène dans sa globalité et d'agir en temps opportun.

Ce travail s'intéressera à l'élaboration d'une base de données numérique, à partir d'un système d'information géographique (SIG), sur la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane (Centre-Nord de l'Algérie). Ceci à travers la construction de plusieurs couches d'informations (nature du sol, pente, précipitations et occupation du sol) pour arriver à hiérarchiser les différentes zones du bassin versant, en produisant une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion. Cette première ébauche cartographique est un outil devant aider les décideurs pour une meilleure gestion des ressources en eau et en sol et pour protéger le barrage de Beni Amrane contre l'envasement.

Mots clés : Erosion hydrique, vulnérabilité, SIG, bassin versant du barrage de Béni Amrane.

Abstract:

Water erosion of soils is one of the serious environmental problems in Northern Algeria. This phenomenon affects large land portion in the north of the country. The available cartographic data are very old and no longer allow to view the phenomenon in its entirety and to act in a timely manner. This work focuses on the development of a digital database, based on a Geographic Information System (GIS), on the multifactorial vulnerability to water erosion of the Beni Amrane dam watershed (North-Central of Algeria). This is achieved through the collection of different layers (soil type, slope, precipitation and land use) in order to prioritize the different zones of the watershed, producing a synthetic map showing the distribution of degrees of erosion sensitivity. This first cartographic draft is a tool to assist decision-makers in better management of water and soil resources and to protect the Beni Amrane dam from siltation

Keywords: Water erosion, vulnerability, GIS, Beni Amrane dam Watershed.

SOMMAIRE :

Introduction générale	1
<i>Chapitre premier : Synthèse bibliographique</i>	
Introduction.....	2
1.1. Généralités sur l'érosion :	2
1.2. Le problème de l'évolution de l'érodabilité des sols	3
1.2.1. La pluviométrie	3
1.2.2. Le sol.....	3
1.2.3. Couvert végétal	3
1.2.4. Relief.....	4
1.2.5. Facteur humain.....	4
1.3. Mécanisme de l'érosion hydrique	5
1.3.1. Impact des pluies sur le processus de détachement	6
1.3.1.1. Le rejaillissement	6
1.3.1.2. La battance	6
1.3.2. Les caractéristiques des sols influençant les processus d'érosion	7
1.3.2.1. Érodibilité	7
1.3.2.2. État de surface	8
1.4. Les formes de l'érosion hydrique.....	8
1.4.1. Erosion en nappe	8
1.4.1.1. Les symptômes de l'érosion en nappe	8
1.4.2. Erosion linéaire	9
1.4.2.1. Formes liées à l'érosion linéaire.....	9
1.4.3. Erosion en masse	10
1.5. Conséquences de l'érosion hydrique.....	11
1.5.1. Sur site.....	11
1.5.2. Hors site	11
1.6. Cartographie et systèmes d'information géographique (SIG).....	12
1.6.1. Définition de la cartographie	12
1.6.2. Définition d'un SIG.....	12
1.6.3. La structuration des données dans un SIG	12
1.6.4. Utilisations des SIG pour la cartographie du risque d'érosion.....	13
Conclusion	15

Chapitre deuxième : Caractéristiques naturelles du bassin

Introduction.....	16
2.1. Situation générale	16
2.3. Caractéristique du barrage de Béni Amrane	18
2.3. Topographie	18
2.4. Géologie.....	22
2.3.1. La lithologie	22
2.5. Le sol	24
2.6. Réseau hydrographique.....	26
2.7. Caractéristiques morphométriques du bassin versant	27
2.8. Occupation du sol	27
2.8.1. Couvert végétal	27
2.8.2. Vocation des agglomérations du bassin	27
2.9. Climat	29
2.8.1. Température	29
2.8.2. Vent.....	29
2.8.1. Précipitations.....	29
Conclusion	32

Chapitre troisième : Cartographie des zones vulnérables à l'érosion

Introduction.....	33
3.1. Méthodologie.....	33
3.2. Vulnérabilité monofactorielle à l'érosion hydrique	35
3.2.1. Erodibilité des sols : La lithologie.....	35
3.2.1. Erosivité des pluies	36
3.2.1. La pente	37
3.2.1. Occupation du sol	38
3.3. Elaboration de la carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique	41
3.4. Résultats.....	43
3.5. Conséquences du transport solide sur l'envasement du barrage de Beni Amrane	43
3.6. Types de protection proposés.....	44
Conclusion	44
Conclusion générale.....	45

LISTE DES TABLEAUX :

Chapitre premier : Synthèse bibliographique

Tableau 1 : Appellation des lignes d'écoulement	9
---	---

Chapitre deuxième : Caractéristiques naturelles du bassin

Tableau 1 : Caractéristiques du barrage de Béni Amrane	18
Tableau 2 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant	27
Tableau 3 : Répartition mensuelle de la pluie en mm	30

Chapitre troisième : Cartographie des zones vulnérables à l'érosion

Tableau 1 : Classes de lithofaciès et indices attribués	35
Tableau 2 : Classes des pluies moyennes annuelles et indices attribués	37
Tableau 3 : Classes de pente et indices attribués	38
Tableau 4 : Occupation des terres et indices attribués	39
Tableau 5 : Classes de sensibilité de couvert végétal à l'érosion selon le type d'occupation du sol	39

LISTE DES FIGURES :

Chapitre premier : Synthèse bibliographique

Figure 1 : Schéma et processus simplifié de l'érosion hydrique	2
Figure 2 : Mécanisme de l'érosion hydrique	6
Figure 3 : Stades de dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies	7
Figure 4 : Différents types de l'érosion	10

Chapitre deuxième : Caractéristiques naturelles du bassin

Figure 1 : Situation du bassin versant du barrage de Béni Amrane	17
Figure 2 : Image satellite du barrage de Béni Amrane.....	18
Figure 3 : Courbe hypsométrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane	19
Figure 4 : Carte altimétrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane	20
Figure 5 : Carte des pentes de la zones d'étude	21
Figure 6 : Carte lithologique du bassin versant du barrage de Béni Amrane	23
Figure 7 : Carte des sols de la zone d'étude.....	25
Figure 8 : Réseau hydrographique du bassin versant du barrage de Béni Amrane	26
Figure 9 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude	28
Figure 10 : Carte des pluies moyennes annuelles du bassin versant du barrage de Béni Amrane	31

Chapitre troisième : Cartographie des zones vulnérables à l'érosion

Figure 1 : Étapes d'évaluation de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols	34
Figure 2 : Sensibilité des sols à l'érosion en fonction de : a) la lithologie, b) la pluviométrie, c) la pente, d) l'occupation du sol.....	40
Figure 3 : Carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane	42

LISTE DES ACRONYMES :

ANBT : Agence Nationale des Barrages et Transferts

ANRH : Agence Nationale des Ressources en eau

CCA : Canadian Cartographic Association

DPAT : Direction de la Planification et de l'Aménagement du territoire

MNA : Modèle numérique d'altitudes

MNT : Modèle numérique du terrain

SIG : Système d'information géographique

SRTM : Image Shuttle Radar Topography Mission

USLE: Universal Soil Loss Equation

Introduction générale

Le sol est un milieu vivant. C'est le siège des processus biologiques vitaux pour la continuité de la vie en milieu terrestre. Il constitue, en effet, les fondements de la quasi-totalité de notre alimentation et de nos ressources forestières. Or, l'érosion façonne la terre depuis qu'elle est émergée...Et depuis plus de sept millénaires, l'homme s'acharne à lutter contre l'érosion pour protéger ses terres contre l'agressivité des pluies et du ruissellement (Lowdermilk, 1953 dans Boughalem, 2013).

Dans la région méditerranéenne, les sols sont sensibles aux risques d'érosion hydrique. Ils sont exposés à de fortes et intenses précipitations, provoquant un phénomène de ruissellement marqué, accéléré par une topographie vallonnée ou montagneuse associée à un faible couvert végétal (Albergel *et al.*, 2010).

En Algérie, l'érosion hydrique constitue un phénomène très grave qui affecte durement le patrimoine foncier. Elle prend annuellement de plus en plus d'ampleur en ce sens que, ces dernières décennies, l'espace naturel algérien a subi des altérations considérables. En effet, l'érosion touche 28 % des terres de l'Algérie du Nord (Achite *et al.*, 2006). Ce phénomène a pour principales conséquences l'envasement des barrages, une la squelettisation des sols et une chute croissante des rendements.

En dépit de sa petite taille, le secteur étudié est parfaitement représentatif de l'évolution du processus d'érosion hydrique dans les bassins versant en Algérie. Le bassin du barrage de Béni Amrane appartient au grand bassin de l'Oued Isser qui se situe au Centre-Nord du pays, est confronté au problème de dégradation du sol, comme pratiquement toute la région du Tell algérien. Ce problème provoque l'envasement du barrage de Béni Amrane et affecte négativement l'agriculture locale en entraînant des pertes énormes en terres arables.

Les contraintes dont est sujet le bassin versant du barrage de Béni Amrane sont une topographie accidentée avec des substrats friables et un impact humain actuellement modéré mais qu'il s'accroît avec le temps.

Or, le problème d'érodabilité des sols ne se pose pas avec la même acuité dans les différentes parties de la zone. C'est pourquoi il est utile de délimiter les zones dont l'aménagement antiérosif est plus urgent que les autres, appelées zones prioritaires.

Le présent Mémoire de Master, intitulé « Vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane » est structuré en trois chapitres tente à donner un document de base permettant de classer les zones étudiées selon leur sensibilité à l'érosion. Pour ce faire, nous nous proposons dans un premier chapitre d'établir un inventaire des différents travaux sur le processus de l'érosion hydrique

Dans le second chapitre, il est question de de présenter les différentes caractéristiques naturelles du terrain d'étude et qui influent directement sur le phénomène d'érosion.

Le dernier chapitre est consacré à établir la carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane en utilisant une démarche méthodologique simple, basée sur l'intégration et le traitement des données multi-sources par les procédures de superposition des SIG.

Chapitre premier

Synthèse bibliographique

Introduction

L'érosion hydrique a été un sujet de recherche attractif et demeure d'actualité. Les travaux sur ce thème englobent l'expérimentation et les solutions analytiques, mais la télédétection spatiale appliquée à l'étude de l'érosion des sols reste le plus souvent l'outil indispensable pour sa prédiction.

Les travaux publiés sur ce sujet montrent, à la fois expérimentalement et théoriquement, la richesse et la complexité du problème. En Algérie, plusieurs chercheurs tels que J. Pouquet et M. Pouget ont décrit les terres et leur érodibilité dans le Tell, d'autres géomorphologues ont analysé les risques d'érosion dans les moyennes montagnes méditerranéennes.

L'analyse bibliographique présente ici, qui ne prétend pas une exhaustivité totale, vise à établir un inventaire des différents travaux élaborés par les différents auteurs.

1.1. Généralités sur l'érosion hydrique

« L'érosion est l'ensemble des actions chimiques, physiques et organiques qui aboutissent à la destruction des roches. C'est essentiellement l'usure superficielle de l'écorce terrestre. L'eau et le vent sont les principaux agents » (Greco, 1966 dans Remmas, 2014).

La cause principale de l'érosion hydrique est la pluie qui tombe sur la surface d'un sol non ou peu protégé et l'eau de ruissellement lorsque le débit de l'eau ruisselée est suffisamment fort pour causer le déplacement des parties du sol. L'érosion hydrique agit donc par l'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol. L'impact de la goutte de pluie est plutôt spécialisé et n'agit que sur les terrains cultivés et les sols meubles dénudés (Dahmani, 2012).

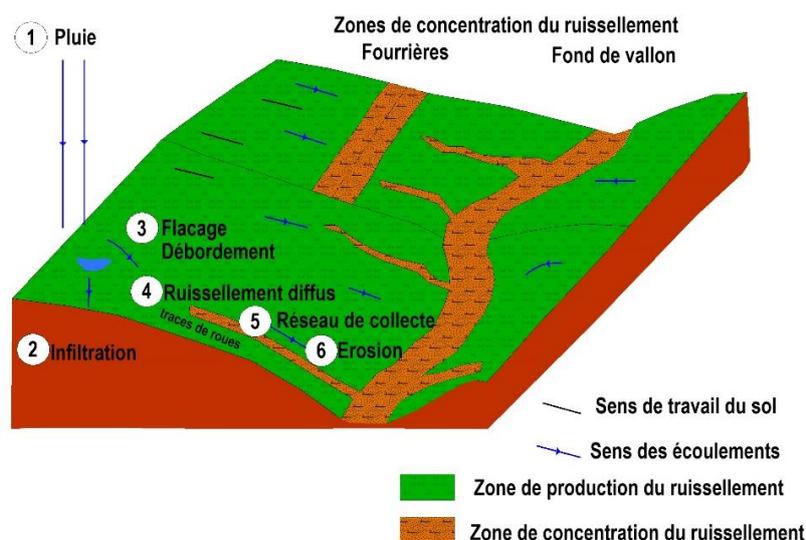


Figure 1.1 : Schéma et processus simplifié de l'érosion hydrique (Bussière, 1996)

1.2. Le problème de l'évolution de l'érodabilité des sols

Le couvert végétal, la pente, les techniques culturales conservatoires et l'agressivité des pluies sont les facteurs majeurs qui régissent l'érosion accélérée des sols (Roose, 1973).

Cependant depuis plusieurs années agronome, pédologues et géographes ont reconnu que les propriétés intrinsèques des sols peuvent modifier l'intensité du phénomène d'érosion hydrique des sols. Ci-dessous on expliquera les principaux facteurs de ce phénomène :

1.2.1. La pluviométrie

La pluie est reconnue depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des sols (Ellison, 1944 ; Ekern, 1950 dans Leguedois, 2003). Les précipitations peuvent avoir deux effets sur l'érosion hydrique des sols, soit par l'impact de la goutte de pluie sur la surface du sol soit par la lame d'eau ruisselée.

Pour l'évaluation du problème de l'érosion hydrique, nous devons tenir compte de l'intensité des pluies. Déjà en 1877, Wollny, cité par Ellison (1944, dans Leguedois, 2003), décrivait l'effet de la pluie sur la désagrégation et la fermeture de la surface des sols. L'énergie et l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface (Boiffin, 1976 ; Le Bissonnais, 1988 dans Leguedois, 2003), du détachement de fragments de sol et de leur transport (Free, 1952 ; Bradford et Huang, 1996 dans Leguedois, 2003).

Lors des averses de fréquence rare tombant sur des sols déjà saturés et de faible épaisseur, les pluies abondantes provoquent des ravinements, des inondations, la dégradation des berges et des glissements de terrains, qui entraînent un envasement rapide des barrages (Roose et De Noni, 1998).

1.2.2. Le sol

Le sol est un facteur intrinsèque qui influe considérablement sur le processus d'érosion par ses propriétés hydrodynamiques et structurales. Les principales caractéristiques des sols qui permettent de déterminer le degré de sensibilité à l'érosion hydrique sont les suivantes : la profondeur, la porosité, la granulométrie, la teneur en matière organique (FAO, 1996 dans Dahmani, 2012), la nature minéralogique des argiles (Auzet, 1987 dans Dahmani 2012), l'infiltrabilité et la cohésion (Mériaux, 1961 dans Dahmani, 2012). Lors de la quantification de l'érosion hydrique, toutes ces caractéristiques sont considérées selon leur contribution au déclenchement de ce phénomène.

Pour la texture, Monnier et Stengel (1982, dans Dahmani, 2012), ont tirés un triangle structural où les sols limoneux apparaissent comme les plus instables contrairement aux sols argileux et aux sols sableux. Les particules du sol les plus fines (argiles) sont caractérisées par une forte cohésion ce qui rend leur détachement difficile tandis que les sables grossiers sont caractérisés par leurs grandes tailles, ceci rend leur transport plus difficile par ruissellement. Les particules limoneuses ont une cohésion plus faible que les argiles et sont plus petites que les sables, elles sont donc facilement détachées de la matrice du sol et facilement transportées par ruissellement.

1.2.3. Couvert végétal

Parmi les facteurs conditionnels de l'érosion, le couvert végétal est certainement le facteur le plus important (Le Bissonais, 2004). Il faut encore ajouter le rôle frein joué par les racines et surtout par les litières sur les nappes ruisselantes. En diminuant la vitesse de ruissellement, le temps d'infiltration et le volume infiltré augmente. Ce freinage par les végétaux est cependant plus efficace sur le piégeage de la charge solide que sur la réduction du volume ruisselé (Benabdeli et Sitayeb, 2007 cité par Aouadj et Gasem, 2009 dans Latreche, 2014).

Quelle que soit la pente, les techniques culturales, la fragilité du sol et l'agressivité climatique, un couvert végétal complet assure une excellente conservation du sol avec son influence prime sur celle de tous les autres facteurs (Le Bissonais, 2002). C'est donc aux méthodes biologiques favorisant ce couvert qu'il faut s'adresser en priorité pour assurer le freinage du ruissellement et d'améliorer l'infiltration et évidemment, la conservation du sol.

1.2.4. Relief

La pente représente un facteur très important dans l'évaluation de l'érosion hydrique, mais ce facteur n'est pas le plus déterminant pour le déclenchement de ce phénomène. Lorsque le couvert végétal est absent et les sols superficiels sont saturés par les eaux de pluies, il se produit un déplacement de particules vers le bas de la pente, même si celle-ci est très faible. (Fauck, 1960 ; Fournier, 1967 cité par Aouadj et Gasem, 2009 dans Latreche, 2014).

La pente intervient dans les phénomènes d'érosion du fait de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur. Selon Roose (1994), la longueur de la pente est moins importante que son gradient et sa forme mais à précipitation égale, il s'accumule sur une pente plus longue un plus grand volume d'eau (Lal, 1982 dans Dahmani, 2012).

Lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante mais le transport s'accélère vers le bas. Merzouk *et al.* (2000, cité par Aouadj et Gasem, 2009 dans Latreche, 2014) ont montré que les pentes en terre croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente.

Théoriquement, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse et acquiert une énergie propre qui se traduit par une érosion en rigoles puis en ravines plus importantes (Nahal et Touhri, 2001 dans Remmas, 2013).

1.2.5. Facteur humain

L'activité humaine est l'un des facteurs majeurs qui influent sur le déclenchement du phénomène de l'érosion hydrique. L'homme, par ses actions peut être à l'origine du déclenchement et de l'accélération de l'érosion par ses actions de défrichement des forêts, incendies, surpâturages et pratiques culturales, aménagements routiers et urbains, en augmentant les surfaces imperméables, ces facteurs exacerbent les inondations et favorisent l'entraînement des particules par ruissellement (Yvio, 2010 dans Souadi, 2011).

Benabdeli (1998, dans Remmas, 2013) note que la mauvaise occupation du sol et le mauvais choix des cultures provoquent une érosion des terrains en pente, cette dernière est évaluée entre 10 et 16 m/ha/an et plus de 13 millions d'hectares (soit 45% de la zone tellienne) de terres agricoles sont menacées par l'érosion de notre pays.

La sensibilité à l'érosion hydrique varie selon le type du couvert végétal existant sur la surface du sol. La vigne et l'arboriculture, par exemple, sont des cultures influant positivement sur la préservation et la valorisation des terres, non seulement par les profits attendus et la couverture qu'elles procurent au sol, mais aussi par les soins dont les parcelles plantées font l'objet et aussi par les cultures intercalaires qui améliorent beaucoup le recouvrement du sol surtout pendant lequel le couvert des arbres est quasi-nul (Calvet, 2003).

1.3. Mécanisme de l'érosion hydrique

Selon Dumas (1965), le mécanisme de l'érosion hydrique peut se décomposer en trois phases :

- a- Phénomène de **détachement** des éléments de terre, il se produit à la surface du sol, les plus fines particules entrent en suspension, le détachement est provoqué par l'effet de gouttes de pluie tombant (splash) sur le sol ou quand la force de cisaillement de la lame d'eau à la surface du sol dépasse les possibilités de résistance au détachement de ce sol.
- b- **Transport** de ces éléments par ruissellement.
- c- **Dépôt** de la terre enlevée.

Dans le phénomène de détachement, l'énergie de la pluie intervient pour détruire les éléments structuraux. Tous les autres facteurs étant identiques par ailleurs, d'après Dumas (1965), cette désagrégation est d'autant plus rapide :

- Que le sol est plus humide au début des pluies (influence de l'antécédent de pluie) ;
- Que la structure du sol est plus instable ;
- Que la surface du sol réellement attaquable est plus grande (intervention de la surface occupée par des cailloux).

Dans le transport des éléments détachées se fait par ruissellement. Selon Dumas (1965), la quantité de terre transportée devrait théoriquement être fonction :

- Du temps d'apparition du ruissellement ;
- Du volume de celui-ci (augmentation de la charge hydraulique) ;
- De la granulométrie du sol.

Le ruissellement apparaît lorsque la vitesse d'apport de l'eau devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Celle-ci décroît d'autant plus vite que le sol a une structure plus instable (effet battance). La perméabilité couplée avec l'instabilité du sol interviendrait donc dans le phénomène d'érosion (Dumas, 1965).

Enfin, la capacité de stockage de l'eau (terre à saturation) peut elle aussi intervenir quand elle devient facteur limitant avant la perméabilité. Ceci peut arriver en particulier dans le cas de sols sableux peu épais sur roche imperméable (Dumas, 1965).

Le dépôt s'effectue lorsque l'énergie cinétique qui déplace les matériaux issus du détachement, diminue ou s'annule (Demangeo, 2000 dans Remmas, 2013). Les particules arrachées se déposent entre le lieu d'origine et les mers. Elles se déposent en général dans l'ordre suivant : Sable, sable fin, limon.

Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où ils se déposent soit après évaporation de l'eau, soit après floculation.

1.3.1. Impact des pluies sur le processus de détachement

1.3.1.1. Le rejaillissement

Les gouttes de pluie heurtant un sol nu détachent des particules qui sont éjectées dans toutes les directions, c'est un phénomène connu de longue date (De Ploey et Savat, 1968 dans Leguedois, 2003). Chaque litre d'eau de pluie arrivant au sol détache environ dix grammes de sol par rejaillissement. Cette capacité d'abrasion est du même ordre que celle d'une rigole ou d'une ravine où la distance moyenne de projection des particules est de 10 à 20 cm, c'est-à-dire beaucoup plus que l'observation visuelle du phénomène ne le laisse supposer (Dahmani, 2012).

Si la libération de l'énergie cinétique d'une goutte d'eau à son point d'impact sur le sol est suffisante, et suivant son importance et les caractéristiques de ce sol, on pourra assister à l'éclatement de la goutte d'eau sous formes de gouttelettes plus petites qui rebondissent. Il s'ensuit un détachement partiel ou total des particules du sol à l'endroit de l'impact ainsi qu'une projection de ces particules à une certaine distance de l'impact, soit à l'intérieur des gouttelettes précédentes, soit de façon séparée, avant de se déposer à la surface (Dahmani, 2012). Ce rejaillissement d'eau et de sol est communément désigné par le terme de splash (Leguedois, 2003).

1.3.1.2. La battance

L'action des pluies sur la surface du sol détruit les agrégats selon les mécanismes décrits précédemment et si la texture et la composition physico-chimique du sol s'y prêtent, la structure initiale du sol peut être totalement détruite. La surface du sol passe d'un état meuble et poreux à un état plus compact. La couche superficielle s'individualise par rapport au reste du profil et forme une croûte de battance qui diminue considérablement la perméabilité du sol. Elle participe ainsi à la formation du ruissellement (Dahmani, 2012).

Le splash a un rôle déterminant dans la formation de ces croûtes : la couche superficielle est compactée et sa rugosité diminue sous l'action des pluies. La capacité de rétention de l'eau sous forme de flaque est ainsi réduite et l'excès d'eau va se transformer plus souvent et plus rapidement en ruissellement (Dahmani, 2012).

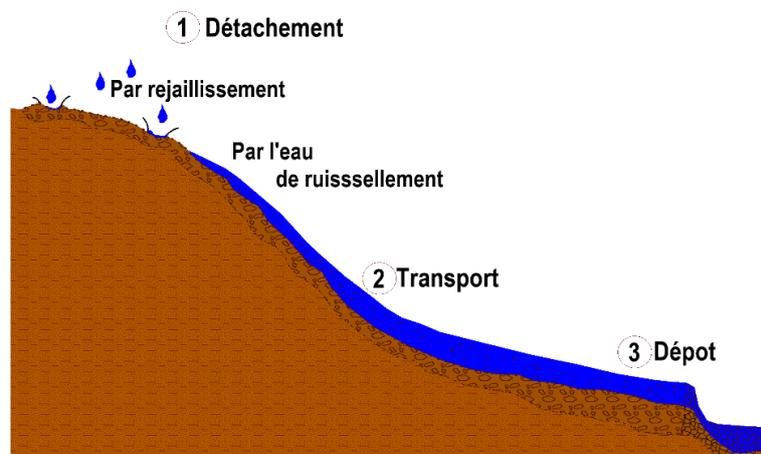


Figure 1.2 : Mécanisme de l'érosion hydrique (Remmas, 2014)

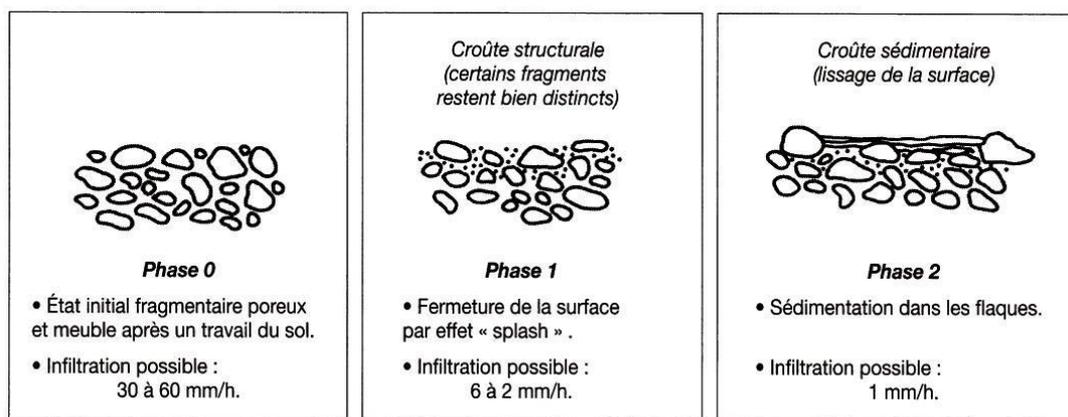


Figure 1.3 : Stades de dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies

(Boiffin, 1984)

1.3.2. Les caractéristiques du sol influençant les processus d'érosion

La stabilité structurale d'un sol est la résistance qu'il oppose quand il est soumis à différentes contraintes, en particulier à l'action dégradante de l'eau (Boiffin, 1976 ; Angers et Carter (1996) cités par Amézketa, 1999 dans Leguedois, 2003).

Le compactage des sols en surface rend ces derniers plus sensibles à l'effet splash, de plus, l'effet du poids des engins agricoles en profondeur, influence l'évolution de leur comportement notamment l'imperméabilisation progressive ou brutale (Dahmani, 2012).

Plusieurs critères liés à la nature du sol participent dans le phénomène de l'érosion hydrique, dont le plus important pour apprécier la résistance d'un sol à l'érosion est la stabilité structurale (Soltner, 1975 dans Dahmani, 2012). La stabilité structurale est influencée par :

1.3.2.1. Érodibilité

Selon Bryan *et al.* (1989 dans Leguedois, 2003), l'érodibilité désigne la susceptibilité globale des sols face au processus érosif. Leguedois (2003) a considéré que si les processus érosifs sont pris séparément, on peut associer à chacun une catégorie de propriétés structurales:

- À la désagrégation, la stabilité structurale ;
- À la mise en mouvement, la cohésion de la surface du sol ;
- Au transport, la microtopographie.

Les principaux facteurs influençant la stabilité structurelle :

- **La texture :** les sols avec trop peu d'argiles ont une faible cohésion, ces sols ont donc une faible stabilité structurelle tandis que les sols riches en limons et/ou sables fins sont sensibles à l'érosion hydrique, la petite taille des particules limoneuses et leur faible cohésion facilite le détachement de ces dernières de la matrice du sol et facilite ainsi leur transport. Les sables grossiers et les sables fins ont une faible cohésion mais leur taille qui est plus grande que les limons rend le transport est moins facile par les eaux de ruissellement.
- **La matière organique :** la matière organique favorise l'agrégation des particules entre elles et l'infiltration de l'eau en modifiant la mouillabilité du sol (Dahmani, 2012). Dans les sols non calcaires ou qui contiennent des teneurs faibles d'oxydes

de fer et aluminium, elle est même le facteur principal de cohésion des agrégats entre eux (Oades, 1993 ; Angers, et Carter, 1996 dans Boughalem, 2013). La matière organique réduit les risques d'érosion à court terme : la matière organique maintenue en surface protège le sol de l'énergie de pluies et du ruissellement (Barthes *et al.*, 1998 dans Dahmani, 2012), mais enfouie, elle ne réduit nettement ni le ruissellement ni l'érosion (Roose *et al.*, 1997 dans Dahmani, 2012).

- **Le type de cation dans le sol** : la majorité des cations rencontrés dans le sol (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} , H^+ ...) ont un effet bénéfique ou neutre sur la structure du sol, sauf le sodium (Na^+) qui agit comme dispersant dans le sol et contribue à sa dégradation (Boughalem, 2013). La nature des minéraux argileux influe sur la stabilité des agrégats du fait de leur propriété de gonflement à l'eau. Les phénomènes de gonflement-retrait entraînent une microfissuration des agrégats qui ne se traduit pas systématiquement par une désagrégation mais facilite les désagrégations ultérieures (Dahmani, 2012).

1.3.2.2. Etat de surface

Selon Armand (2009, dans Boughalem, 2013), l'état de de surface du sol désigne en général les couvertures végétales et minérales du sol ainsi que la structure des premiers centimètres de ce dernier.

La relation entre structure du sol et érosion est rétroactive puisque les flux de particules générés par les processus érosifs viennent modifier la surface (Leguedois, 2003). Cette réorganisation des premiers millimètres du sol conduit à la fermeture de la surface et à la réduction de sa capacité d'infiltration en créant des croûtes de battance (McIntyre, 1958 dans Leguedois, 2003).

Deux principaux types de croûtes sont distingués (Bresson et Boiffin, 1990 ; Valentin et Bresson, 1992 dans Leguedois, 2003), les croûtes structurales et sédimentaires. Les croûtes d'érosion résultent de l'érosion partielle de ces deux types de croûtes. Elles concernent surtout les sols sableux. Chacun de ces états de surface est caractérisé par une capacité d'infiltration et une cohésion (Leguedois, 2003).

1.4. Les formes de l'érosion hydrique

1.4.1. Erosion en nappe

On parle d'érosion en nappe dans le cas de la modification de l'état structural de la pellicule superficielle du sol par les gouttes de pluies et le transport des matériaux détachés s'effectue par le ruissellement en nappe (Roose, 1980). C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion. Lorsqu'il y a l'érosion en nappe, le déplacement des particules se fait d'abord par effet splash à courte distance et ensuite par ruissellement en nappe (Zaher, 2010).

1.4.1.1. Les symptômes de l'érosion en nappe

Le premier symptôme le plus connu de l'érosion en nappe est la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés, les plus agressés des champs (haut de collines, et rupture de pentes) (Zaher, 2010).

Le deuxième symptôme est la remontée des cailloux en surface par les outils de travail du sol. Les paysans disent que « les cailloux poussent », il s'agit en réalité d'une fonte de

l'horizon humifère et d'un travail profond du sol qui remonte en surface les cailloux. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies soit par drainage en profondeur, soit par érosion sélective, tandis que les cailloux trop lourds pour être emportés s'accumulent à la surface du sol (Zaher, 2010).

1.4.2. Erosion linéaire

D'après Hjulström (1935, dans Zaher, 2010), ce type d'érosion intervient à la suite du ruissellement ou lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol.

L'érosion linéaire est exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions, elle apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise, il creuse des formes de plus en plus profondes selon la ligne de plus grande pente (Zaher, 2010). Selon la profondeur de ces lignes, le vocabulaire employé est différent :

Tableau 1.1 : Appellation des lignes d'écoulement (d'après Roose, 1994)

Profondeur	Appellation
Quelques centimètres	Griffes
>10 cm	Rigoles
10 à 20 cm Quelques mètres de large	Nappe Ravinante
>50 cm	Ravines

L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses : non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe sélective, mais des graviers ou des cailloux et des blocs lorsqu'il sera organisé en ravines (Dahmani, 2012).

1.4.2.1. Formes liées à l'érosion linéaire

On distingue les griffes, rigoles et les ravineaux qui ne sont pas comblés par les agriculteurs avant la récolte.

- **Les griffes** sont des micros formes éphémères qui entaillent les microreliefs formés par les lignes de semis : leur profondeur est inférieure au lit de semence, leur largeur n'excède guère 10 cm et leur longueur ne dépasse le mètre que lorsqu'elles s'allongent parallèlement aux rangs et aux inters rangs, elles ont toujours un caractère périodique (Boiffin *et al.*, 1986 dans Dahmani, 2012).
- **Les sillons** sont des formes stables, rectilignes parallèles les unes aux autres dans le sens de la pente et qui présentent des profils en long identiques à celui du versant. Ces incisions ont une profondeur qui s'adapte au volume d'eau à écouler, sans toutefois excéder une profondeur de 10 cm. Toujours plus larges (de 5 à 70 cm) que profondes (3 à 10 cm), les rigoles ont des tracés sinueux. Ce type d'érosion apparaît généralement à l'occasion de pluies d'orages de forte intensité (Heusch, 1988 dans Dahmani, 2012).
- **Les rigoles** sont prolongées à l'aval par les ravines dont la profondeur atteint la semelle de labour et qui sont trouvées dans les régions de grande culture, en général localisées dans des dépressions ou des talwegs. Leur tracé s'adapte à la topographie

et le profil transversal présent la forme d'un U dans les sables (Le Bissonais, 1996 dans Dahmani 2012).

- **Les ravins** dont la profondeur peut atteindre deux mètres. Ces deux dernières formes ne sont pas toujours comblées par le travail du sol effectué par l'agriculteur alors que les griffures peuvent être effacées par une simple pluie (Dahmani, 2012). Cette érosion par ruissellement concentré ou érosion de talweg peut se produire même dans des régions à faible pente et pour des épisodes pluvieux de faible intensité (Souchère, 1995 dans Dahmani, 2012).

A l'échelle d'un bassin-versant, toutes les formes d'érosion peuvent se combiner. Le ruissellement, à l'origine d'une érosion diffuse peut provoquer quelques mètres plus loin une érosion de type rigole inter-rigole puis, après concentration entraîner l'érosion du talweg.

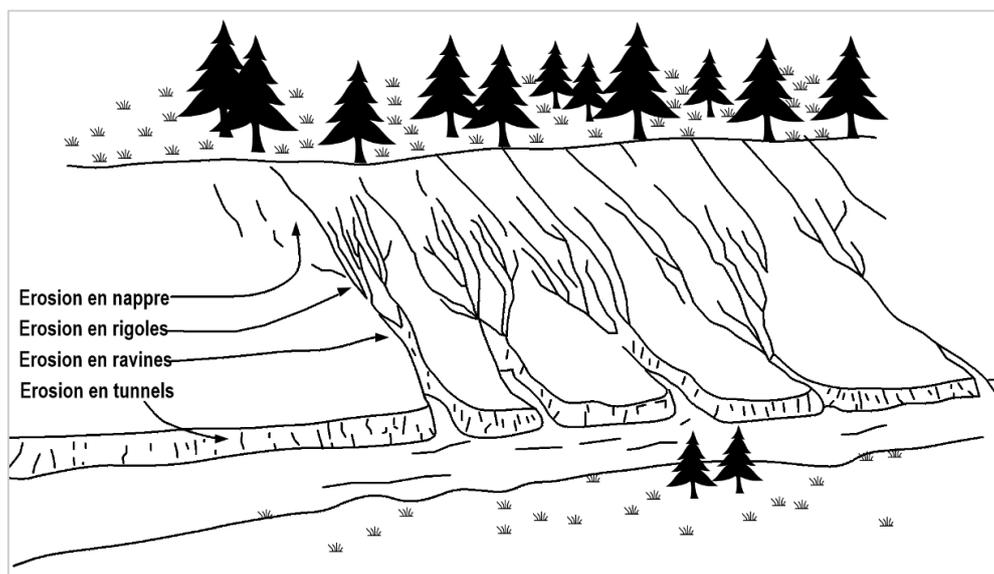


Figure 1.4 : Différentes formes de l'érosion (Remmas, 2014)

1.4.3. Erosion en masse

Cette forme d'érosion se diffère de l'érosion en nappe par la forme de déplacement des terres. On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre selon des formes non définies, comme les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain (Zaher, 2010).

- **Les glissements lents** : C'est le glissement lent, sans décollement, des couches plus ou moins épaisses de la couverture pédologique, qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers et à la forme en crosse de la base des arbres adultes (Roose, 1994).
- **Les glissements rapides** : Les glissements de terrain en planches sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement. Ce phénomène est très courant sur les schistes dont le pendage est parallèle à la topographie (pendage conforme) sur les gneiss et sur les marnes en voie d'altération (Roose, 1994).
- **Les versants moutonnés** : formes molles apparaissant dans des conditions humides lorsque les horizons superficiels dépassent le point de plasticité et progressent lentement, comme une pâte dentifrice, entre la trame de racines qui retient l'horizon de

surface et l'horizon compact imperméable que représente l'altérité des marnes ou des argilites par exemple.

- **Les coulées boueuses :** ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante. Lorsqu'elles viennent de se produire, elles se présentent sous forme d'un canal terminé par une langue de matériaux de texture très hétérogène (cône de déjection). Les matériaux fins sont repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou en rigole, laissant en place une masse de cailloux et de blocs de taille très hétérogène. Elles apparaissent souvent à la suite d'un glissement en planche ou dans une ravine lors d'une averse exceptionnelle nettoyant les altérites accumulées depuis quelques années (Rapp, 1972 dans Roose, 1994).
- **Les glissements rotationnels :** cette forme d'érosion est apparue en périodes très humides, Ce sont des glissements où la surface du sol et une partie de la masse glissent en faisant une rotation, de telle sorte qu'il apparaît une contre pente sur le versant. Il s'agit souvent de toute une série de coups de cuillère, laissant au paysage un aspect moutonné (Roose, 1994).
- **Les formes locales :** Il s'agit d'éboulements rocheux, de sapements de berges ou d'effondrements de versants qui entraînent des glissements localisés. Ceux-ci sont très fréquents en tête de ravine : ils entraînent l'éboulement de la partie supérieure des lèvres d'une ravine et font progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive. On les retrouve également dans les oueds, en particulier dans les parties concaves de la rivière lorsqu'elle forme un méandre (Roose, 1994).

1.5. Conséquences de l'érosion hydrique

Aujourd'hui, l'érosion des sols participe à plusieurs grands problèmes environnementaux qui perturbent la planète. Ci-dessous on donne les principales conséquences d'après Zaher (2010) :

1.5.1. Sur site (en amont)

- Pertes en terre et en éléments nutritifs ;
- Pertes d'engrais et de matière organique ;
- Destruction de la structure du sol ;
- Réduction de la profondeur du sol ;
- Abandon des terres et par conséquent baisse de rendement.

1.5.2. Hors site (à l'aval)

A côté des dégâts bien visibles concernant les terres cultivées, il existe des dégâts en aval beaucoup plus insidieux provoqué par l'augmentation du ruissellement et l'entraînement des particules du sol. Nous pouvons donc, illustrer certains de ces dégâts en aval à savoir :

- Charger les rivières en matières en suspension qui a par conséquent l'augmentation de la turbidité des eaux et la modification de l'équilibre trophique, l'entraînement des particules des sols s'accompagne également de celui des intrants agricoles (engrais, pesticides) et des polluants d'origine industrielle, urbaine et routière.
- Eutrophisation des eaux de surface : L'apport important de sédiments dans les eaux de ruissellement peut inclure des éléments azotés et phosphatés et même des métaux lourds peuvent être également transportés ;
- Ensablement des lits des cours d'eau ;

- Dégâts aux infrastructures routières ;
- Les inondations dues aux eaux de ruissellement par suite de la réduction de la capacité d'infiltration des sols dégradés, et la baisse de niveau ou assèchement des nappes et points d'eau à cause des pertes d'eau par ruissellement ;
- L'envasement des barrages : Le processus de l'envasement influe sur le volume d'eau utile emmagasiné dans les barrages entraînant une diminution de capacité de stockage de ces derniers. Ce problème de sédimentation est lié aux phénomènes de l'érosion hydrique dans le bassin versant. (Medjber, 2011).

1.6. Cartographie et systèmes d'information géographique (SIG)

1.6.1. Définition de la cartographie

La cartographie est la discipline qui s'occupe de la conception, de la production, de la diffusion et de l'étude des cartes. La cartographie est aussi la représentation – la carte. La cartographie englobe donc tout le processus de la création de cartes (Association internationale de cartographie, s.d. dans CCA, 2017).

La cartographie d'aujourd'hui possède deux caractéristiques essentielles : les cartes qui jouent un rôle fondamental et indispensable comme pilier de la civilisation. Actuellement, plusieurs activités reliées à la surface de la Terre seraient impraticables sans les cartes. L'humanité fait face à plusieurs problèmes sévères dont plusieurs concernant l'environnement et la cartographie s'avère un outil crucial dans la recherche de solutions. Associée à la grande capacité de collecte de données et de capacité d'analyse de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG), la cartographie, dans plusieurs cas, fournit la clé à la découverte de solutions (CCA, 2017).

La seconde caractéristique de la cartographie d'aujourd'hui est sa nature dynamique. La discipline de la cartographie est au cœur d'une révolution engendrée par les avancées technologiques de l'informatique en utilisant l'ordinateur et les logiciels les plus récents (CCA, 2017).

1.6.2. Définition d'un SIG

Un SIG est un outil informatisé capable de créer, transformer, afficher, analyser et stocker de l'information géographique. Il permet d'organiser et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées, en vue notamment de produire des plans et cartes (Christine, 2017).

D'après Christine (2017), l'information géographique contient :

- La forme et la localisation de l'objet localisé, sous forme graphique.
- Les caractéristiques qualitatives et quantitatives caractérisant l'objet localisé, sous forme de tableau.

1.6.3. La structuration des données dans un SIG

Selon Christine (2017), les données dans un SIG sont structurées de la manière suivante :

- a) **Les données graphiques** : Il existe deux types de données graphiques visualisables dans un logiciel SIG : les données raster et les données vectorielles.

- **Les données raster** : Ce sont des images, avec comme unité de base le pixel. Ces images ne permettent pas d'association avec des données alphanumériques en dehors des attributs de chaque pixel. Ces attributs sont peu intéressants pour la réalisation des cartographies statistiques, puisque celui-ci ne peut connaître que les caractéristiques de chaque pixel de base.
 - **Les données vectorielles** : Les éléments géographiques représentés grâce à des données vectorielles sont localisés par des coordonnées (X, Y). Ils sont constitués de trois types d'entités : point (symboles ponctuelles), ligne (route, rivière...), polygone (région, parcelle...). Les données vectorielles traitent les objets géographiques individuellement.
- b) Les données alphanumériques** : Les données alphanumériques sont l'ensemble des données qualitatives et quantitatives associées à chaque entité du fichier de formes.

1.6.4. Utilisations des SIG pour la cartographie du risque d'érosion

Les SIG sont des outils rapides d'exécution, flexibles et très puissants capables d'intégrer un grand nombre de facteurs et de les présenter sous une forme facilement interprétable (Zurayket *al.*, 1999 dans Biko, 2012). Ils permettent de stocker et de structurer les informations cartographiques de base, et d'intégrer les différentes caractéristiques du bassin versant pour mettre ensuite en place une base de données interactive des facteurs de l'érosion, avec une localisation des zones susceptibles de produire les sédiments, à des moindres coûts et avec un degré de précision appréciable pour de vastes superficies. Les techniques de télédétection associées aux SIG permettent ainsi d'évaluer les quantités de pertes en sols à l'hectare par l'intégration du modèle universel révisé des pertes en sol (Yjjou, 2014).

Les données spatialisées de chaque paramètre sont traitées séparément sous forme de couches d'informations et intégrées (superposition des couches) dans le SIG pour en ressortir la carte de distribution du risque d'érosion (Mutua *et al.*, 2005 dans Biko, 2012). Les SIG permettent de donner une solution au problème d'intégration des cartes analogiques avec sa plateforme qui permet de superposer différentes couches d'informations caractérisant plusieurs phénomènes, et qui aboutit à l'élaboration des cartes relationnelles très utiles comme outil d'aide à la décision.

Divers travaux témoignent du grand nombre de méthodes de modélisation et de logiciels pouvant être utilisées pour cartographier les risques dont certains sont à base empirique. Au début des années 1980 avec le développement des sciences de l'informatique. On a commencé à intégrer dans des Systèmes d'Information Géographique les paramètres des différents modèles. Ci-dessous on citera quelques modèles utilisés pour la cartographie du risque d'érosion :

- **Universal Soil Loss Equation (USLE)**

C'est un modèle empirique de perte en terre qui a été élaboré en 1960 et mis à jour par de Wischmeier et Smith en 1978. Il est établi à partir du traitement statistique des résultats de nombreuses mesures en parcelles expérimentales. Il a d'abord été mis au point pour des conditions de milieux existant aux Etats-Unis et n'est pas forcément applicable tel quel

(définition des paramètres) dans d'autres régions et notamment dans le milieu méditerranéen (Délusca, 1998).

Ce modèle considère que l'érosion hydrique est une fonction multiplicative et son équation est la suivante :

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Où : A est l'érosion attendue en t/ha, R l'indice d'érosivité des pluies, K l'indice d'érodibilité du sol, L est fonction de la longueur de la pente, S de la valeur de cette pente, C est un paramètre relatif aux pratiques culturales, P un indice qui caractérise les pratiques de lutte antiérosive.

Selon De Regoyos Sainz (2003 dans Sadjania, 2015), ce modèle quantitatif est simple mais pas assez précis. L'USLE a la particularité de s'appliquer seulement à l'érosion en nappe et de ne pas prendre en compte les autres types d'érosion. La méthodologie consiste à codifier individuellement chaque facteur d'influence (pondération), à croiser ces données sur ArcGis avec le modèle USLE et à les combiner pour identifier les zones de vulnérabilité.

- **Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**

Ce modèle est une révision de l'USLE qui a été créé en 1997 pour améliorer les six facteurs de l'ancien modèle. Il est employé par plusieurs auteurs qui ont évalué le risque érosif à l'étranger, au Texas, en Grèce, à Madagascar ou encore au Maroc.

- **Water Erosion Prediction Project (WEPP)**

Ce modèle est basé sur les sols, les cultures et le climat. Il permet de déterminer la production d'un ruissellement lors d'un événement pluvieux en simulant les processus de détachement, transport et sédimentation. Son équation est la suivante : $\frac{dG}{dx} = Di + Dr$

Avec G = charge sédimentaire (kg /m.s)

X = distance le long du versant (m)

Di = taux d'érosion inter-rigoles (kg/m² s)

Dr = taux d'érosion en rigole (kg / m² s).

Selon De Regoyos Sainz (2003 dans Sadjania, 2015) le WEPP donne aussi la possibilité d'estimer la date et le lieu d'une perte de sol importante sur un bassin versant.

Plusieurs auteurs ne se sont pas basés sur les modèles existants mais ils ont tous la même approche méthodologique. Le traitement de données est une étape primordiale qui consiste à préparer les couches cartographiques avant tout traitement supplémentaire. Dans les études consultées, l'imagerie satellitale (Landsat TM ou Spot) a largement été utilisée pour représenter les différents facteurs d'influence. Ces images rasters ont fait l'objet de plusieurs traitements (par exemple des classifications pour identifier la densité du couvert végétal ou le type d'occupation du sol) sur plusieurs logiciels de télédétection (Idrisi, Erdas imagine ou Monteverdi). Cette source de données est par la suite intégrée dans un logiciel de SIG (ArcGis, Qgis, Grass, Saga ou MapInfo).

Le codage est l'étape suivante et donne la possibilité de caractériser les critères. Plusieurs méthodes peuvent être employées (Saby, 1998 dans Sadjania, 2015) :

- **Les méthodes par hiérarchisation** que l'on peut diviser en trois groupes :

- La méthode additive : la somme de toutes les notes attribuées
 - La méthode multiplicative : la multiplication des notes de chaque facteur
 - La méthode combinatoire : la combinaison des deux précédentes
-
- **L'arbre de décision** : En fonction des notes données à chaque critère il permet de faire apparaître l'ensemble des situations sur un territoire donné. Cerdan *et al.* (2006 dans Sadjania, 2015) utilisent cette méthode dans leur guide méthodologique pour un zonage départemental. L'arbre de décision était essentiellement basé sur les connaissances des experts.
 - **La méthode de rang** : Elle consiste à hiérarchiser les facteurs en fonction de leur contribution au phénomène érosif.

Conclusion

Ce travail a permis de préciser et d'analyser les éléments nécessaires pour effectuer le mémoire en question.

Nous avons vu dans ce chapitre que l'érosion hydrique constitue un problème spécifique qu'il faudrait traiter. Pour l'appréhender, sans doute faudrait-il tout d'abord concentrer des efforts pour connaître les zones fortement ravinées avec priorité d'intervention, où la cartographie de la sensibilité des terrains à l'érosion, en tenant compte de tous les facteurs de risque, reste la meilleure solution, dans notre cas, pour la prédiction de ce phénomène.

Chapitre deuxième

Caractéristiques naturelles de la zone d'étude

Introduction

Les données utiles à l'élaboration d'une étude de l'érosion hydrique sont multiples, nombreuses et souvent dispersées. La constitution d'une liste d'informations accessibles et disponibles sur le site d'étude avec identification de la source est nécessaire en amont de la consultation.

Nous avons déterminé précédemment les principaux facteurs de risque de l'érosion hydrique. Ce chapitre décrira donc les principaux facteurs naturels qui influent sur ce phénomène dans bassin versant du barrage de Béni Amrane.

2.1. Situation générale

Le bassin versant au droit du barrage de Béni Amrane est situé au Centre-Nord du pays, il est compris entre les latitudes 36°17'32'' et 36°40'16'' Nord et les longitudes 3°21'12'' et 3°56'26'' Est, avec une superficie totale de 847 Km², soit plus de 20% de la surface totale du bassin versant de l'Oued Isser dont il fait partie.

Cette entité hydrographique est limitée naturellement :

- Au Nord par le massif de Béni Amrane ;
- A l'Est par l'oligocène de Drâa El Mizane ;
- A l'Ouest par les formations oligocènes du Djebel Bou Zegza ;
- Au Sud par la partie haute du bassin versant moyen Isser.

Le bassin versant au droit du barrage de Béni Amrane est situé environ à 70 km au Sud-Est de la Wilaya d'Alger et est constitué de l'atlas tellien, il s'étage entre les côtes altimétriques 54 et 1265 m.

Administrativement, le bassin versant couvre quatre Wilayas : Bouira dans sa quasi-totalité où 86,5 % de la superficie totale du bassin se trouve dans cette dernière, Boumerdes (9,11%), Tizi-Ouzou (2,3%) et Médéa (1,95%).

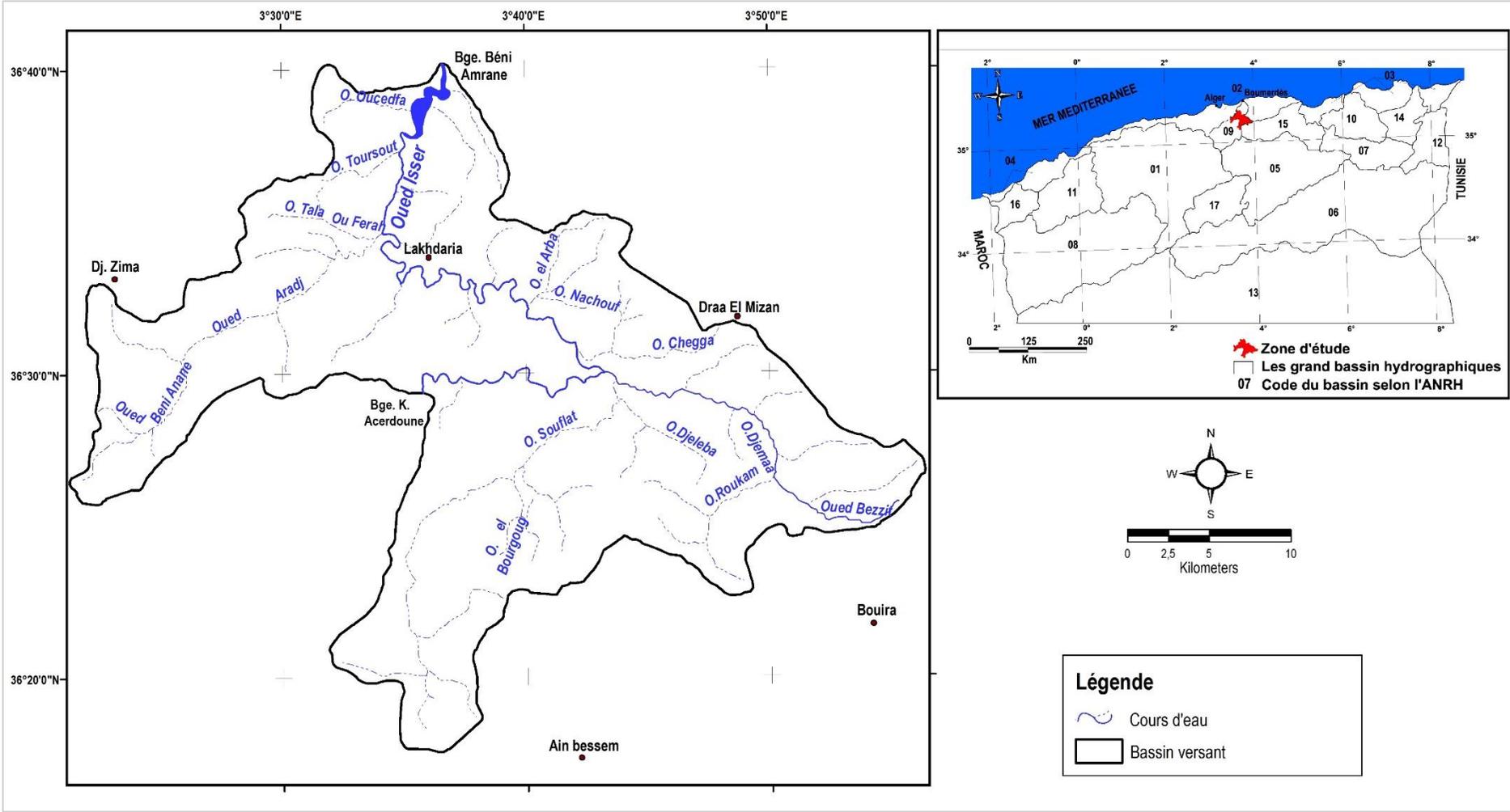


Figure 2.1 : Situation du bassin versant du barrage de Béni Amrane

2.2. Présentation du barrage de Béni Amrane

Le barrage de Béni Amrane est situé dans la Wilaya de Boumerdès à l'Est de la ville de Béni Amrane, de coordonnées géographiques (Lat. 36° 42' 46''N, Long. 3° 32' 50''E), sur l'Oued Isser. Le barrage a été mis en service en 1988.

Le barrage de Béni Amrane, qui se trouve à 20 Km de la côte, fait partie du système Isser - Keddara - Boudouaou - Alger. Cet aménagement est destiné à satisfaire les besoins en eau potable, non seulement du grand Alger, mais aussi des villes se trouvant dans la zone Est de la Mitidja, entre Alger et l'Oued Boudouaou (ANB, 1997).

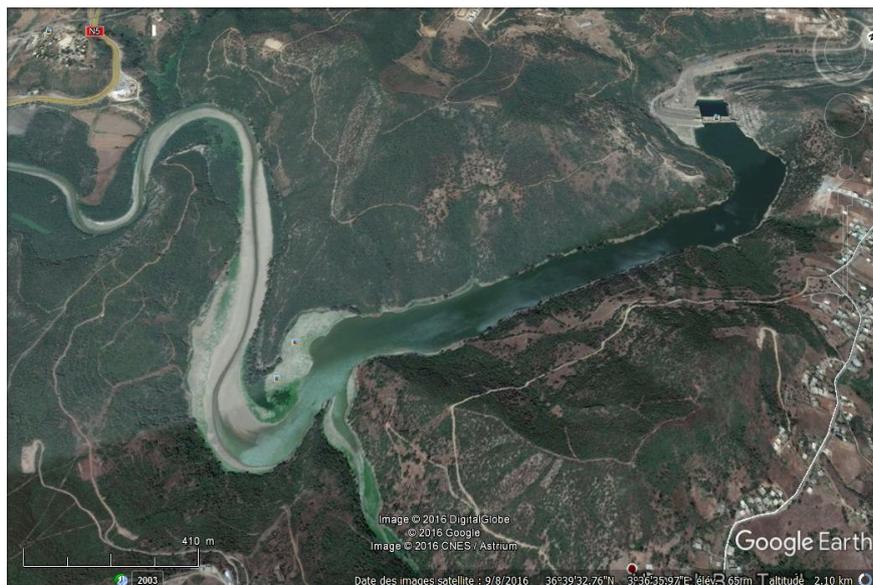


Figure 2.2 : Image satellite non traitée du barrage de Béni Amrane

2.3. Topographie

L'aspect général de la zone est typiquement montagneux. Du nord vers le sud, le relief prend de l'ampleur ou l'on note une côte maximale de 1265m au Djebel Béni Fouada.

La topographie de la zone est répartie en deux parties distinctes :

- Une topographie accentuée sur la bordure du massif occidental de Djurdjura où les altitudes sont comprises entre 54 et 1031m ;
- Un relief plus ou moins accentué. Il se situe entre l'altitude 900 m à la station Lakhdaria à 1265m au Djebel Beni Fouada.

De point de vue hypsométrique, le relief est considéré comme un facteur majeur reflétant l'aptitude du bassin versant au ruissellement. La courbe hypsométrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane (figure 2.3) nous permet de distinguer les tranches suivantes :

- Les tranches entre [54m, 200m], occupent 2 % de la surface totale du bassin ;
- Les tranches entre [200m, 600m] occupent 35 % de la surface du bassin ;
- Les tranches entre [600m, 1265m] occupent 63 % de la surface du bassin.

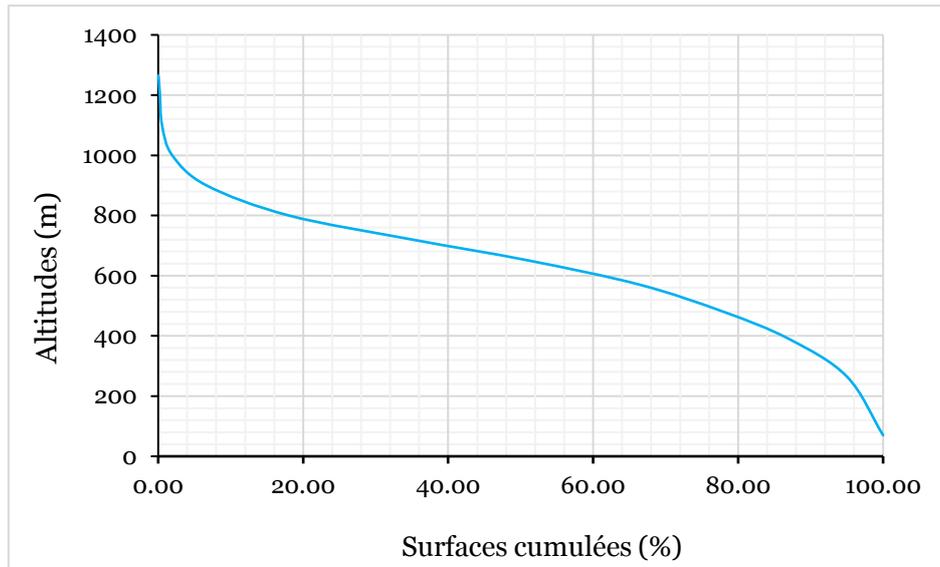


Figure 2.3 : Courbe hypsométrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane

De point de vue pente, neuf classes ont été identifiées. La pente varie dans le bassin de 1 à 42,5 %, elle est faible et inférieure à 5% à proximité d'Oued Isser et au sud du bassin et elle augmente en s'éloignant de ces derniers. Les classes entre 15-35%, éparpillées sur tout le territoire, représentent plus de 35% de la surface du bassin versant (Figure 2.4). Ces résultats montrent le caractère accidenté du bassin versant du barrage de Béni Amrane.

Les deux figures (2.4 et 2.5) ci-dessous représentent le modèle numérique du terrain (MNT) et la carte des pentes de la zone d'étude.

La carte altimétrique du bassin a été établie après digitalisation des courbes de niveau, sur un SIG, de la carte topographique d'Alger au 1/250000 de coordonnées Lambert France, 1956.

Le traitement de l'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de coordonnées géographiques WGS 84 et de résolution 30 m, obtenue sur le site <https://earthexplorer.usgs.gov/> a permis d'établir un modèle numérique d'altitude (MNA) et d'établir la carte des pentes.

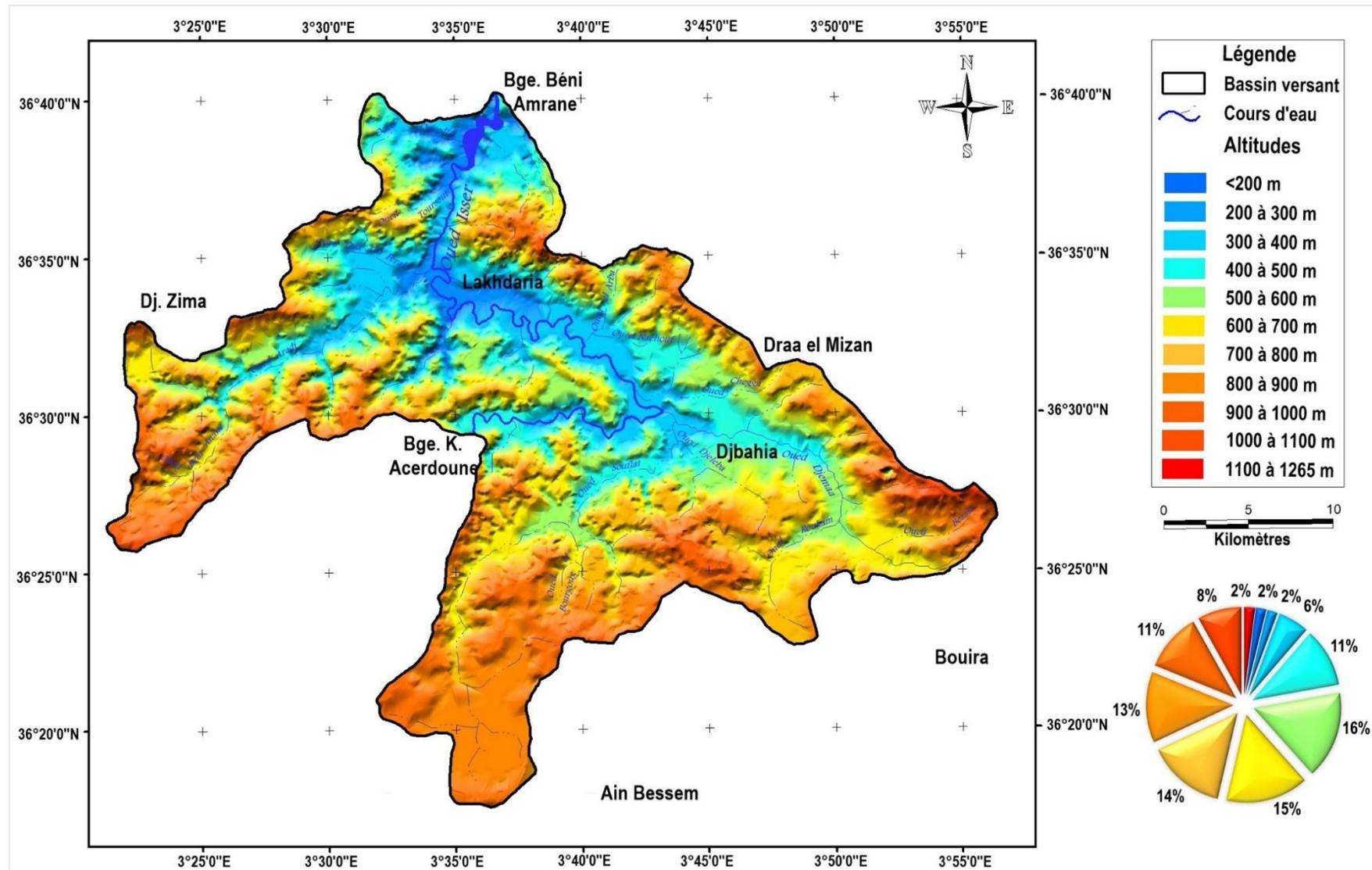


Figure 2.4 : Carte altimétrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane

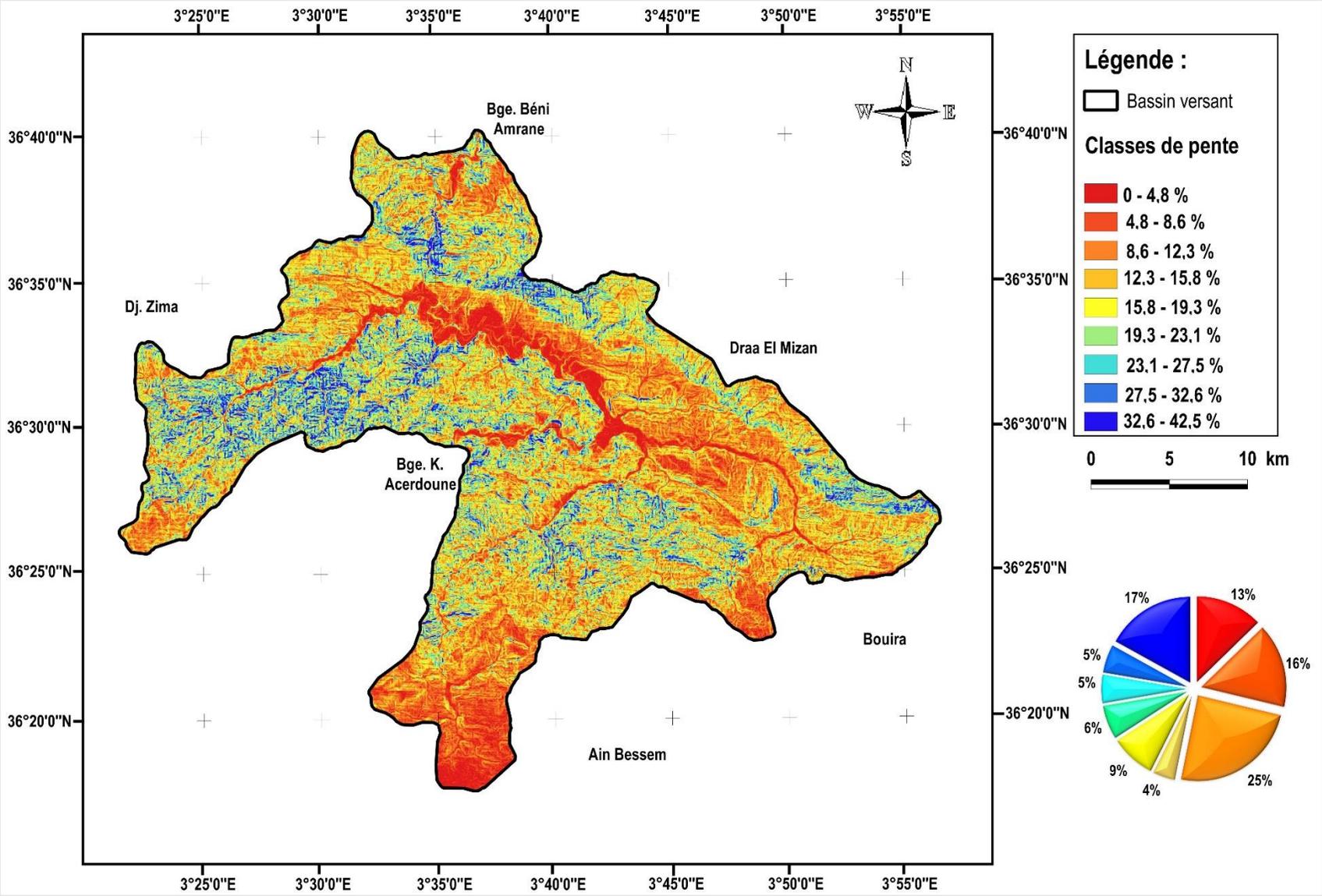


Figure 2.5 : Carte des pentes de la zones d'étude

2.4. Géologie

Le sous bassin versant de l'Oued Isser appartient au vaste ensemble géologique qui est le Tell septentrional kabyle, Les études géologiques antérieures ont montré que le bassin versant au droit du barrage de Béni Amrane se caractérise par sa complexité tant structurale que stratigraphique, il montre aussi l'existence de formation métamorphique d'âge précambrien recoupée localement par des roches intrusive et d'autre part par des formations sédimentaires.

Pour l'étude géologique, on se limitera à une description lithologique du bassin versant afin de connaître le degré d'érodibilité dans le bassin.

2.4.1. Lithologie

Les marnes grises et calcaires lités occupent 46% du bassin versant. Ces formations appartiennent au crétacé supérieur (Coniacien-Maestrichtien et Cénomaniens). On rencontre l'Eocène supérieur dont les formations sont présentées par les marnes, grés et calcaires gréseux constituant 18% de la superficie totale du bassin. Le crétacé inférieur (Aptien et Albien) est représenté par des Flysch, marnes et d'argiles de quartzite ; ces formations constituent 11% du bassin. Les argiles, marnes et grés appartenant au Miocène moyen occupent 6% de la surface totale.

Le bassin de Béni Amrane est constitué ainsi de 4% d'Oligocène dont les formations sont présentées par des argiles et grés. Les Paléozoïques micaschistes granulitisés et gneiss granulitiques occupent aussi 4% de la surface du bassin. On y trouve le Jurassique occupé par les marnes et calcaires qui représentent 4% du secteur d'étude, 1% de ce dernier est occupé par le Miocène inférieur (Aquitaniens) dont les principales formations sont les cailloutis et argiles sableuses rougeâtres. On note la présence des traces des alluvions actuelles et récentes de sables, graviers et argiles au voisinage d'Oued Isser appartenant au Quaternaire formant moins de 1% du bassin.

Le bassin versant au droit du barrage de Béni Amrane présente en général des formations friables et meubles (alluvions récentes, marnes argileuses...), facilement érodables.

En partant de la carte lithostratigraphique du nord de l'Algérie établie par l'Agence nationale des ressources en eau (ANRH), nous avons créé une carte lithologique du bassin versant du barrage de Béni Amrane (figure 2.6) en procédant à des digitalisations à partir de la carte source. Cette dernière a été calée en fonction du système de coordonnées adopté à savoir « Universal Transverse Mercator (WGS84), Hémisphère Nord, zone 31 ». La structure de la table, de par les informations qu'elle contient, est composée d'objets vectoriels représentant les surfaces (polygones).

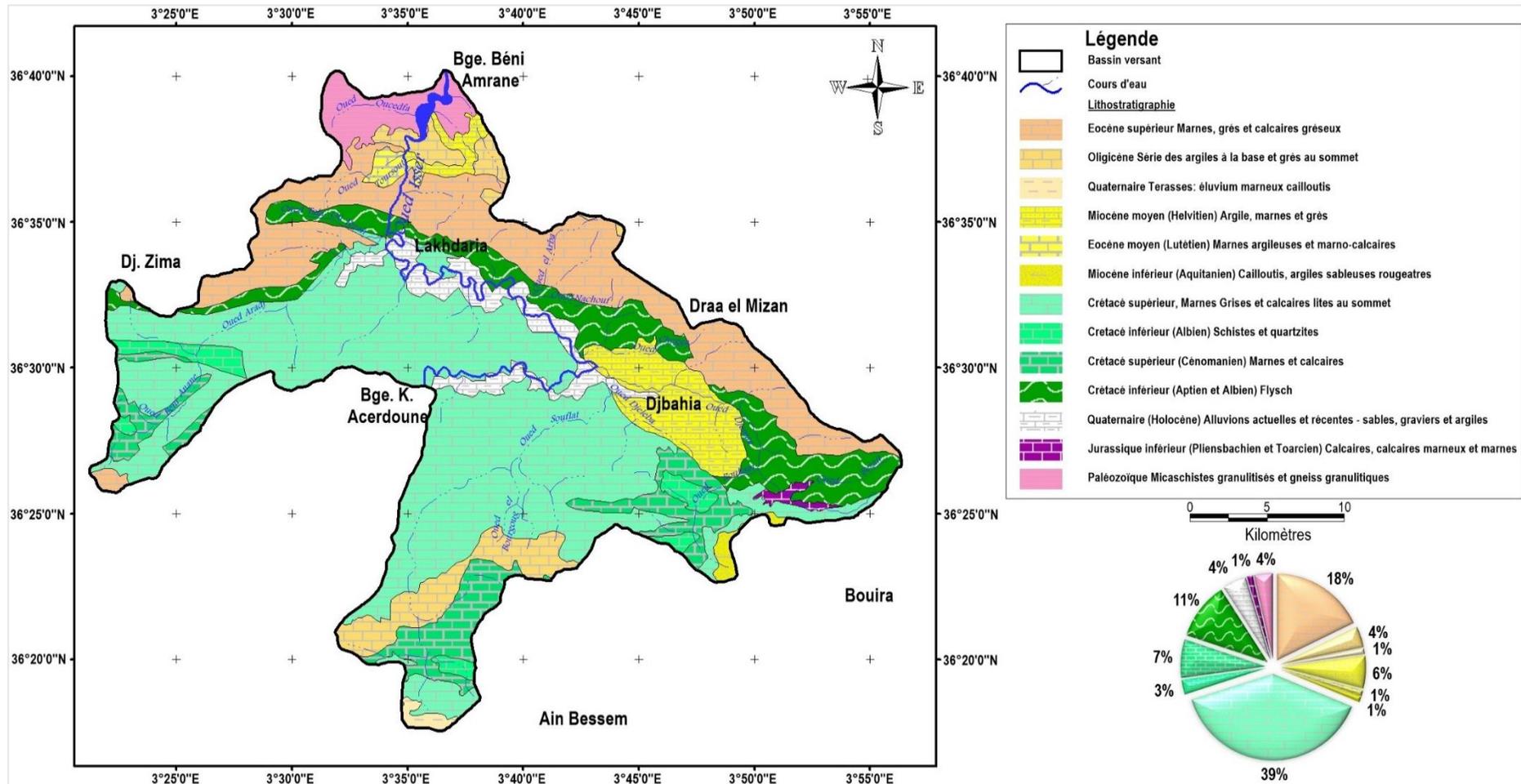


Figure 2.6 : Carte lithologique du bassin versant du barrage de Béni Amrane (Carte lithostratigraphique du nord de l'Algérie, s.d.)

2.5. Sol

Selon la carte des sols éditée par M.J-H Durand (1954), les sols des régions telliennes humides peuvent se définir par leur mode de formation originale : entrainement de substances en profondeur sous l'action des eaux infiltration. Mais cette migration est conditionnée par la nature de la roche mère, très variable dans le Tell algérien du fait de sa structure plissée.

Les types des sols existant dans notre bassin sont :

- **Sols calcaires** : ils occupent 47% de superficie totale su bassin. Les sols calcaires n'ont qu'un seul horizon différencié et se caractérisent par l'accumulation du calcaire au sommet du profil.
- **Sols insaturés** : ils représentent 28% de la surface totale et occupent le Nord et le sud-Est du bassin. Ces sols résultent de la décomposition superficielle de roches non calcaires donnant des éléments grossiers riches en bases ou encore des éléments argileux imperméables : sols formés par les schistes, les micaschistes, basaltes, granites basiques, ainsi que sur les alluvions argileuses.
- **Sols alluviaux** : ils se trouvent le long d'Oued Isser et caractérisés par :
 - Horizons peux différenciés ;
 - Charge en galets importante ;
 - Texture légère ;
 - Sols basiques.
- **Sols en équilibre** : ces sols occupent le sud du bassin, ils ne représentent qu'un seul horizon différencié peu épais. Ils sont formés sur roche mère non calcifère et contiennent des doses appréciables de matières organiques (entre 0,3 et 1%), mais pas de sels solubles. Les caractères de ces sols sont :
 - Texture légère ;
 - Bonne perméabilité ;
 - Faible rétention de l'eau due à leur relative pauvreté en colloïdes.
- **Sols podzoliques** : ils représentent la plus faible proportion de la superficie totale du bassin. Ces sols sont formés à partir de roches non calcaires, produisant des éléments grossiers pauvre en base ; perméabilité et pluviométrie sont alors suffisants pour permettre la destruction quasi-totale du complexe absorbant.

La figure 2.7 ci-dessous représente la carte des sols de la zone d'étude, en procédant à des digitalisations à partir de la carte des sols d'Alger au 1 : 500 000 éditée en 1954, dûment calée en fonction du système de coordonnées adopté à savoir « Universal Transverse Mercator (WGS84), Hémisphère Nord, zone 31 ». La structure de la table, de par les informations qu'elle contient, est composée d'objet vectoriels représentant les surfaces (polygones)

2.6. Réseau hydrographique

Le bassin de Béni Amrane est caractérisé par un réseau hydrographique très dense. Il est traversé par l'Oued Isser et ses affluents à l'Est et à l'Ouest de celui-ci. L'Oued Isser est formé par la réunion de l'Oued El Hammam issu de calcaires marneuses de crétacé inférieur de Berroughia, ce dernier draine le bassin sur une longueur de 61 Km où l'écoulement se fait du Sud vers le Nord. Les affluents de l'Oued Isser dans notre bassin se limitent à l'Oued Djemaa, le reste des affluents ne sont que de petites rivières pérennes ou saisonnières. Parmi les cours d'eau pérennes et saisonnières qui drainent le bassin :

A l'Est :

- Oued Béni Anane, Oued Aradj et Oued Tala Ou Ferah. Ces derniers se regroupent et forment un seul cours d'eau à 1 km environ du lit majeur de l'Isser ;
- Oued Ouedfa et Oued Toursout à l'aval du bassin.

Au centre :

- Oued Isser : il se prolonge du barrage de Koudiat Acerdoune jusqu'au barrage de Béni Amrane.

A l'Ouest :

- Oued Bezzit, Oued Roukam, Oued Djeleba et Oued Souflat : ils font partis des effluents saisonnières d'Oued Djemaa qui se prolonge de son part sur une longueur de 25 km ;
- Oued el Arba et Oued Nachouf qui se regroupent et forment un seul cours d'eau à 2 km environ du lit majeur de l'Isser.

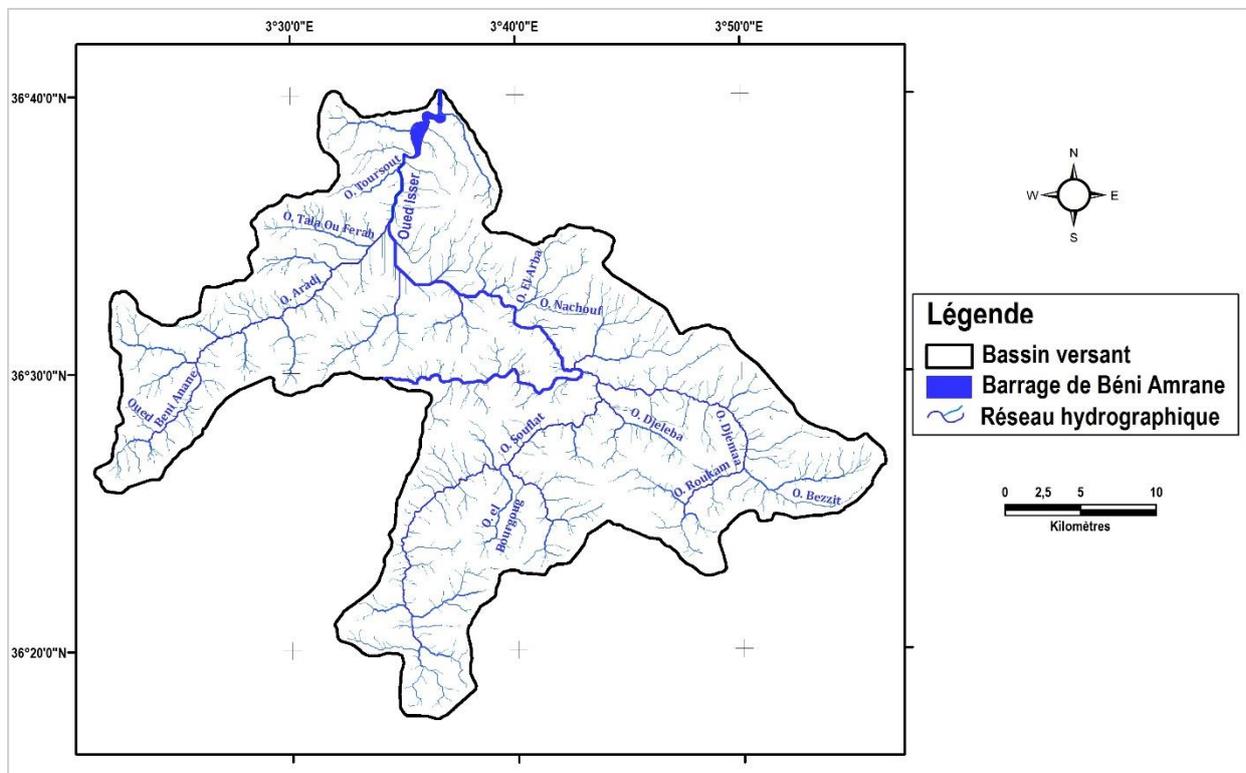


Figure 2.8 : Réseau hydrographique du bassin versant du barrage de Béni Amrane

2.7. Caractéristiques morphométriques du bassin versant

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sur le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Nous allons donner dans le tableau 2.2 ci-dessous quelques caractéristiques morphométriques de notre bassin :

Tableau 2.2 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant

Caractéristique	Unité	Valeur
Surface	Km ²	846,9
Périmètre	Km	203,4
Longueur du rectangle équivalent	Km	92,72
Largeur du rectangle équivalent	Km	9,13
Altitude maximale	m	1265
Altitude minimale	m	54
Altitude médiane (H _{50%})	m	645
Indice de compacité de Gravélius (KC)	-	1,96
Indice de pente globale (Ig)	%	6,04
Longueur d'Oued Isser (Du barrage de Koudiat Acerdoune jusqu'au barrage de Béni Amrane)	Km	61

2.8. Occupation du sol

2.8.1. Couvert végétal

La végétation, typiquement méditerranéenne, est étagée en fonction de l'altitude. Sa répartition dans notre région d'étude est dominée par les forêts, maquis et reboisement les zones boisées tiennent une place importante dans le bassin, il est à noter que sur les montagnes et les piémonts, la culture d'olives et d'autres espèces forestières telles que le peuplier, le châtaignier et le pin qui prédominent ces zones soit plus de 70% de la superficie totale du bassin.

Sur les collines, on trouve essentiellement la pratique de la céréaliculture, des fourrages et de la culture melon. Les grandes cultures en sec occupent les Sud-Est du bassin avec un taux de 6% de la zone d'étude. Les plaines, tout en long d'oued Isser sont couvertes des cultures maraîchères et d'arboricultures fruitières.

Ce taux de recouvrement de la végétation, bien qu'important comparé à celui de nombreux bassins versants du pays, demeure insuffisant compte tenu de l'importance des superficies à très forte déclivité et à substratums très sensibles à l'érosion.

2.8.2. Vocation des agglomérations du bassin

La vocation des agglomérations du bassin de barrage de Béni Amrane est essentiellement agricole. Une telle croyance avait sa source dans les immenses terres fertiles qui s'étendent vers l'Ouest, les grandes plaines où poussent si bien les vignes et le blé.

Les zones urbaines ne représentent qu'une faible proportion de la superficie totale du bassin, ces dernières existent essentiellement dans les communes de Lakhdaria et Kadiria au centre du bassin, dans la commune de Djebahia à l'Est et dans la commune de Souk el Kremis au Sud du bassin.

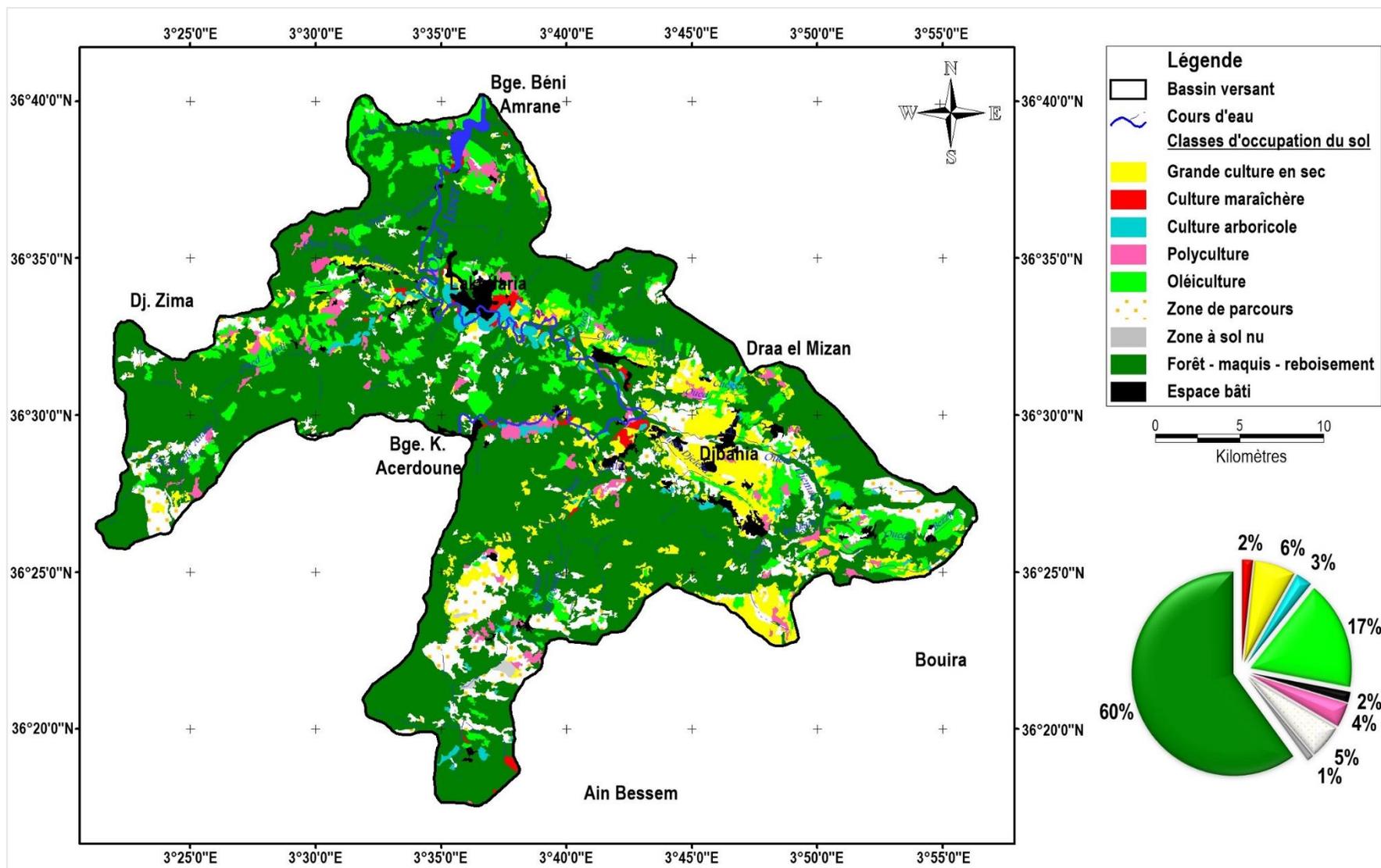


Figure 2.9 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude (Cartes d'occupation du sol des Wilayas de Boumerdès, Médéa, Tizou Ouzou et Bouira, 2011)

La carte d'occupation du sol de la zone d'étude (Figure 2.9) a été élaborée en procédant à des digitalisations à partir des cartes d'occupation du sol des Wilayas de Bouira, Boumerdès, Tizi Ouzou et Médéa à une échelle de travail de 1 : 25 000 éditée en 2011 par l'Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage, dûment calée en fonction du système de coordonnées adopté à savoir « Universal Transverse Mercator (WGS84), Hémisphère Nord, zone 31 ». La structure de la table, de par les informations qu'elle contient, est composée d'objets vectoriels représentant les surfaces (polygones) où neuf classes de couvertures végétales apparaissent.

2.9. Climat

D'après Sogetha-Sogreah (1962 dans Boussaid, 2014), la région de l'oued Isser est soumise au climat de l'atlas tellien, présentant des degrés de continentalité qui croît très rapidement en s'éloignant de la mer.

Le bassin est soumis à un climat méditerranéen intermédiaire entre le climat Tellien de montagne pluvieux et à l'amplitude thermique faible, avec des chutes de neige et le climat Tellien de plaine plus sec relativement chaud et présentant de forts écarts de température.

8.1. Température

La zone d'étude est caractérisée par un climat méditerranéen à deux saisons : Un été sec et chaud et un hiver avec généralement des précipitations courtes et violentes. La saison relativement froide de Décembre à Mars. La température moyenne est de 12° C et la saison chaude d'Avril à Novembre avec des maxima de 33 à 38° C et varie de 2 à 12 °C de janvier à mars (Bouhamadouche, 1993).

8.2. Vent

Les vents chargés d'humidité sont de direction Nord-Sud à Nord-Ouest et sud-Est alors que les vents desséchant sont de direction Sud-Nord (Bouhamadouche, 1993).

Une étude statistique de l'US Naval Weather service implanté au large d'Alger (station d'observation (Lat. : 37°4', Long : 3°9')) a mis en évidence que les vents dominants sont ceux de l'Ouest et du Nord-Ouest et soufflent en prédominance de Novembre à Avril et sont généralement suivis par des pluies en hiver.

Les vents Est et Nord-Est soufflent en été, et vents du nord sont plus fréquents et soufflent durant toute l'année. Le sirocco, vent du sud, chaud et sec de direction Sud-Est et Sud-Ouest souffle sur tout le bassin avec une faible intensité à une moyenne de 20 jours/an. En outre, la zone connaît des gelées fréquentes en moyenne 13 jours par an (Annuaire statistique de la Wilaya de Boumerdès D.P.A.T, 2004).

8.3. Précipitations

La répartition mensuelle de la pluie au niveau de la station El Djebahia (09 04 03) est donnée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.3 : Répartition mensuelle de la pluie en mm

(1991 – 2011)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
P_{moy}	29,49	41,30	76,35	99,72	82,59	82,19	58,34	59,02	48,26	6,07	5,12	8,00

(ANRH, 2016)

On remarque d'après le tableau ci-dessus que les fortes pluies sont enregistrées pendant la période allant du mois de Novembre au mois d'avril qui représentent la période humide et sont minimales pendant la période estivale Juin, Juillet et Aout.

On enregistre une valeur minimale de 5,12 mm pendant le mois de juillet et une valeur maximale de 99,72 mm enregistrée pendant le mois de Décembre.

Le régime pluviométrique est caractérisé par une irrégularité intra et interannuelle, souvent la torrencialité des averses. La concentration des pluies est sur une part assez courte de l'année. Mais de manière générale, les précipitations décroissent du Nord au Sud du bassin.

Le bassin versant au droit du barrage de Béni Amrane est compris entre les isohyètes de 350 à 900 mm.

Les variations des précipitations sont sensibles entre le sud et le nord du bassin. Ces pluies sont nettement insuffisantes en été, moyennes au printemps et maximales en hiver.

En partant de la carte des pluies moyennes annuelles de l'Algérie du Nord établie par l'Agence nationale des ressources en eau (1979-2005), nous avons créé une carte des pluies moyennes annuelle du bassin versant du barrage de Béni Amrane (Figure 2.8) en procédant à des digitalisations à partir de la carte source. Cette dernière a été calée en fonction du système de coordonnées « Universal Transverse Mercator (WGS84), Hémisphère Nord, zone 31 ». La structure de la table est composée d'objets vectoriels représentant les surfaces (polygones).

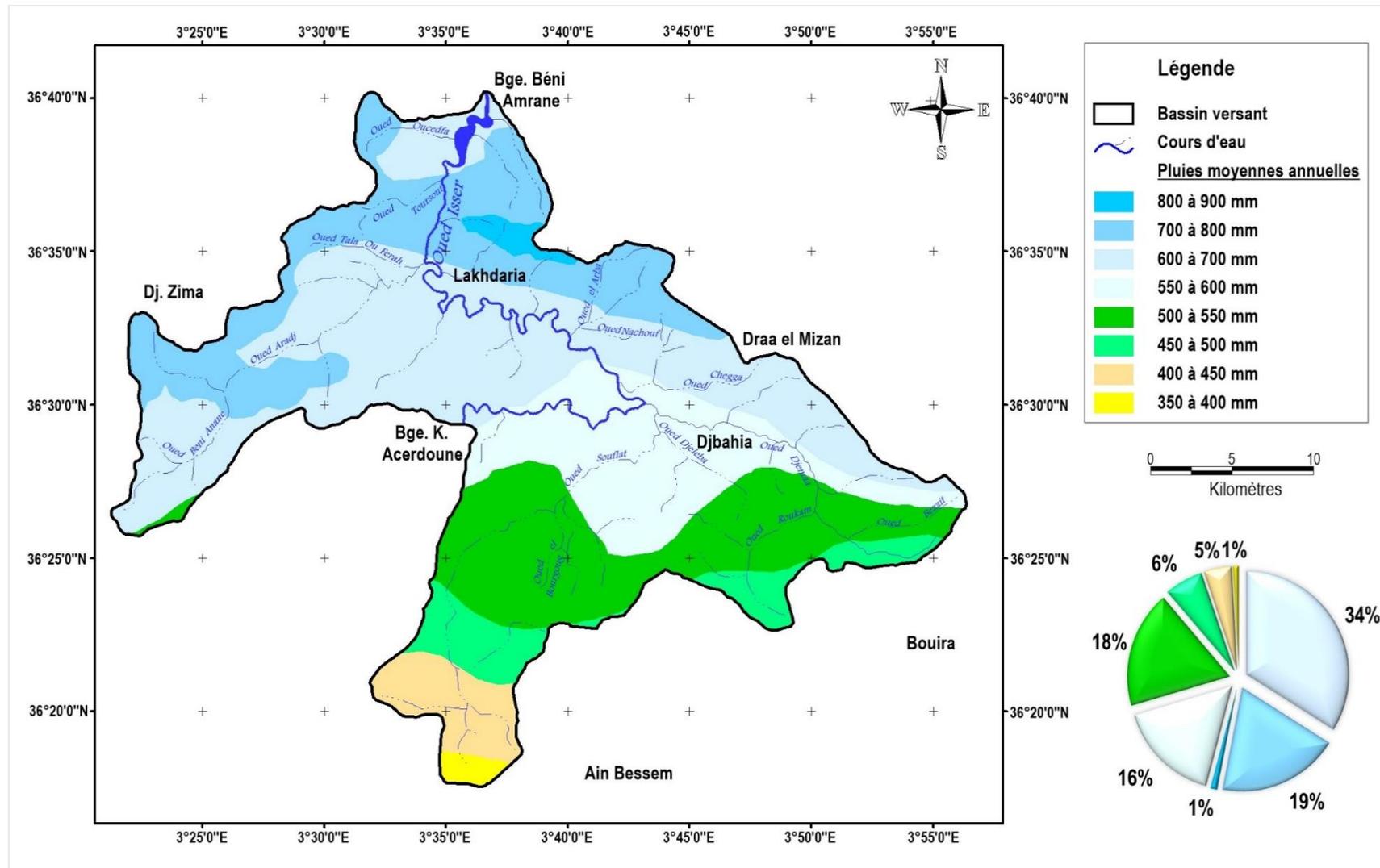


Figure 2.10 : Carte des pluies moyennes annuelles du bassin versant du barrage de Béni Amrane (Carte des pluies moyennes annuelles de l'Algérie du Nord, 2005)

Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire les différentes caractéristiques physiques et climatiques de la zone d'étude. Les données et les cartes récupérées montrent que le bassin versant au droit du barrage de Béni Amrane est caractérisé par un régime pluviométrique à irrégularité intra et interannuelle avec une torrencialité des averses. La topographie de la zone d'étude est généralement accentuée avec une occupation prédominée par les zones boisées.

Le facteur topographique est donc très favorable à l'écoulement superficiel, les facteurs lithologiques ne sont pas favorables à l'infiltration des eaux, et par conséquent la sensibilité à l'érosion et au transport solide. Il est donc urgent de mettre au point une méthode à la fois rapide et précise pour prévoir la sensibilité des sols à différents types d'érosion.

Chapitre troisième

Cartographie des zones vulnérables à l'érosion

Introduction

Après avoir caractériser la zone d'étude et identifier les différents facteurs de risque d'érosion hydrique, nous allons présenter dans ce chapitre la démarche méthodologique à suivre pour cartographier la vulnérabilité multifactorielle à ce phénomène.

L'approche passe par une analyse des principaux facteurs de l'érosion. Le caractère spatial de cette dernière est mis en évidence à partir de l'intégration des cartes des différents facteurs dans un système d'information géographique (SIG) en vue d'appréhender de manière qualitative l'érosion hydrique pour établir enfin la carte sensibilité des sols à l'érosion du bassin versant du barrage de Béni Amrane.

3.1. Méthodologie

La méthodologie suivie au cours de cette étude repose sur des données satellitaires et cartographiques, ces données seront ensuite intégrées et analysées dans un environnement SIG pour la restitution et la cartographie des zones exposées à l'érosion hydrique.

Parce que l'érosion du sol est particulièrement difficile à mesurer directement en temps réel, il est nécessaire d'utiliser des modèles qui permettent d'estimer le taux ou l'état de ce phénomène. Plusieurs modèles d'érosion ont été élaborés, dont certains sont à base empirique tel que l'USLE (Universal Soil Loss Equation) ses versions modifiées, d'autres à base physique tel que le projet de prédiction de l'érosion hydrique, WEPP de Foster et Lane.

Le choix du modèle dépend de la variabilité de la surface du bassin, des données ponctuelles et des données sur les précipitations (Bonn, 1998 dans Remmas, 2014). Les modèles cités précédemment nécessitent un échantillonnage très précis à partir de mesures ponctuelles en parcelle et des cartes à très grandes échelles. Dans la région d'étude, nous ne disposons que des cartes à des échelles inférieures ou égale à 1/500.000, de plus, l'absence des données sur la pédologie de la région et de l'intensité des précipitations ne permet pas d'utiliser un modèle quantitatif de type USLE. Pour pallier ces inconvénients, nous avons opté pour une méthode qui s'inspire d'un modèle qualitatif de type système expert reposant sur un croisement de paramètres déterminants dans l'érosion sous forme de combinaisons logiques, à savoir : la lithologie, la pluviométrie, la pente topographique et l'occupation des sols, dont les poids doivent être pondérés (Bou Kheir *et al.*, 2001) à partir des connaissances actuelles sur les différents types de fonctionnements érosifs. Les données cartographiques et descriptives des facteurs qui influencent le processus d'érosion hydrique seront intégrées dans un SIG.

La méthodologie est décrite selon l'organigramme présenté dans la figure 3.1.

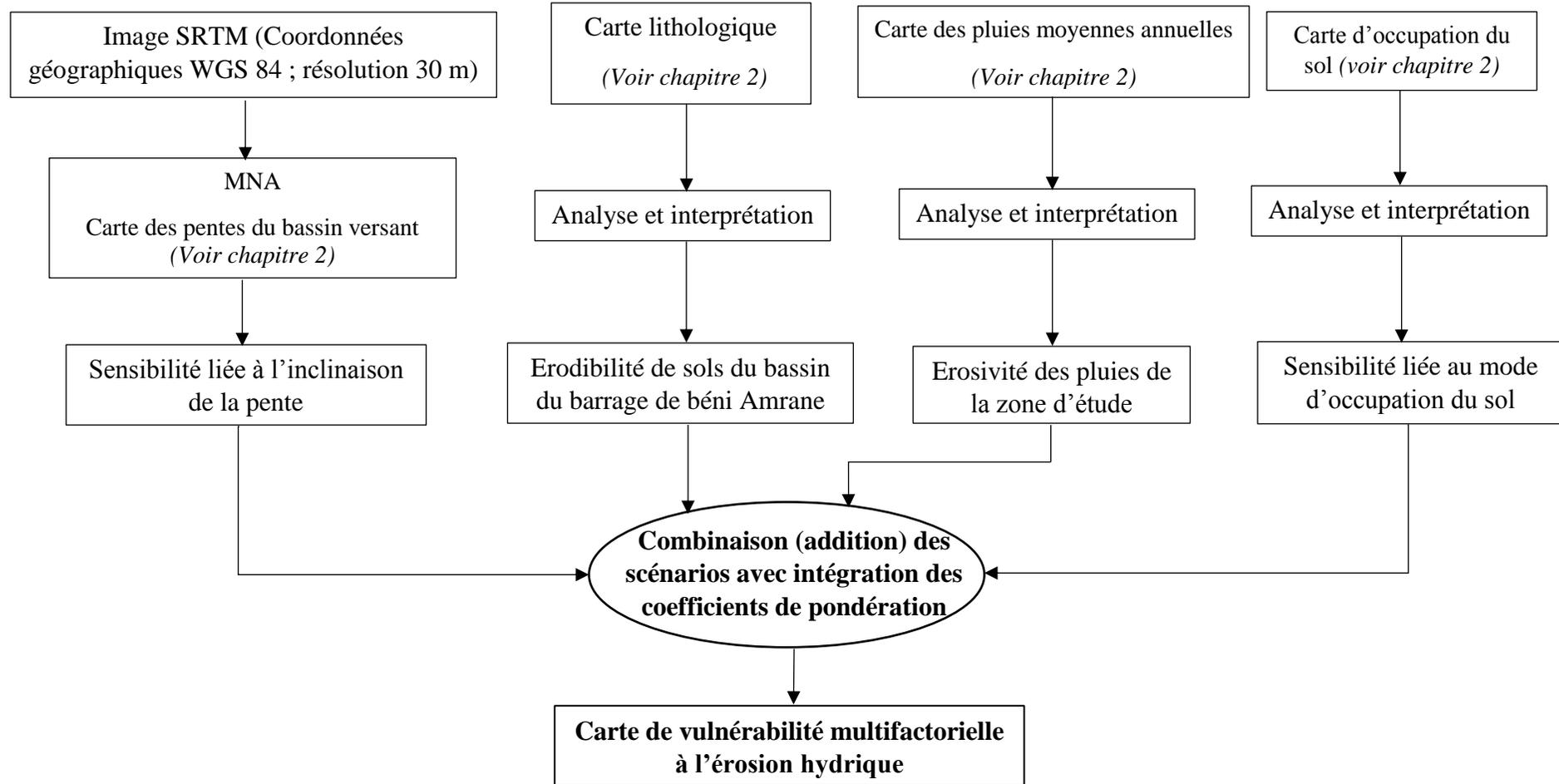


Figure 3.1 : Étapes d'évaluation de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols (A. Meijerink *et al.*, 1994, figure modifiée)

3.2. Vulnérabilité monofactorielle à l'érosion hydrique

3.2.1. Erodibilité des sols : La lithologie

La carte lithologique du bassin versant du barrage de Béni Amrane laisse apparaître une grande diversité des formations superficielles avec prédominance des sols argileux issus des formations marneuses (figure 2.5).

Les classes de sensibilité des sols pour chaque type de sol sont attribuées à partir de leur texture, dont dépendent la formation et la stabilité des agrégats, et qui résulte en grande partie de la nature des matériaux parentaux. Une partie des sols sur roches massives (granite et calcaire) est classée en faible et moyenne érodabilité, alors que les sols sur roches friables (sables et molasses), ainsi que les sols à texture grossière, quel que soit le matériel parental, sont considérés comme fortement érodables (Y. Le Bissonnais *et al.*, 2002).

Quoique les calcaires et les grès soient des formations perméables et dures, leur association avec des argiles gonflantes favorise le déclenchement du ruissellement d'où l'entraînement des particules fines (Arabi *et al.*, 2004).

En prenant en considération le degré de friabilité des substrats. On a regroupé ainsi les faciès argileux et marneux comme friables, flyshiques comme moyennement résistants et gréseux comme très résistants (Maurer, 1968 dans Merzouk *et al.*, 1996).

Les sols marneux lorsqu'ils sont secs, restent non érodables, mais dès qu'ils atteignent une certaine humidité, leur sensibilité à la détachabilité et au ruissellement augmente.

La classification de sensibilité comprend, par ordre croissant, quatre classes ont été identifiées :

- ✓ **Classe 1** : faiblement sensible ;
- ✓ **Classe 2** : moyennement sensible ;
- ✓ **Classe 3** : fortement sensible ;
- ✓ **Classe 4** : très fortement sensible.

Tableau 3.1 : Classes de lithofaciès et indices attribués (F. Gaddas *et al.*, 2010)

Lithofaciès	Lithofaciès existants dans la zone d'étude	Code
Roches compactes non altérées, conglomérats fortement cimentés, croûtes, affleurement de grès ferrugineux, (calcaires massifs, sols fortement rocheux, roches ignées ou éruptives, sols localement encroûtés).	-	1
Roches carbonatées, roches ou sols cohésifs fracturés ou modérément altérés	- Flysch de l'Aptien et de l'Albien - Calcaire et calcaire marneux d'âge jurassique	2

Tableau 3.1 : Classes de lithofaciès et indices attribués (F. Gaddas *et al.*, 2010) (Suite)

Lithofaciès	Lithofaciès existants dans la zone d'étude	Code
Roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schiste, marne...) et roches ou sols peu résistants ou fortement altérés (marne, gypse, ardoise argileuse...)	<ul style="list-style-type: none"> - Schistes et quartzites de l'Albien - Argile, marnes et grés du Miocène - Marne et calcaire du coniacien-Maestrichtien - Marnes, grés et calcaire gréseux de l'Eocène supérieur - Marnes et calcaire du Cénomanién. 	3
Sédiments ou sol meuble, non cohésif et matériel détritique	<ul style="list-style-type: none"> - Cailloutis, argile sableuse rougeâtre du Miocène - Quaternaire Terasses : éluvium marneux cailloutis - Oligocène série des argiles à la base et grés au sommet - Alluvions du Quaternaire 	4

- **Interprétation de la carte de sensibilité à l'érosion selon la lithologie :**

La carte de sensibilité selon la lithologie (Figure 3.2 a) montre que la majeure partie du bassin, soit plus de 75%, est constituée par des roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés et roches ou sols peu résistants ou fortement altérés sur la totalité du bassin. Nous remarquons aussi une fréquence de 14% des sédiments ou sols meubles, non cohésifs et des matériaux détritiques notamment au milieu du bassin et dans les zones de faible à moyenne pente. Les roches carbonatées à grande perméabilité ainsi que les sols cohésifs fracturés ou modérément altérés peu perméables occupent 11% de la surface totale du bassin.

La dominance des sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés et des sédiments meubles augmente les potentialités érosives du bassin versant.

3.2.2. Erosivité des pluies

Les paramètres pluie liés à l'érosion sont :

- La hauteur des précipitations : Plus la hauteur des précipitations est importante, plus le volume d'eau ruisselé est important ce qui favorise le transport solide.
- L'intensité est le facteur principal de l'érosion : Plus l'intensité est grande, plus l'effet de battage du sol est prononcé.

Dans le secteur étudié, on ne dispose que des données de la station pluviométrique de Djebahia (09 04 03), mais avec une seule station pluviométrique, il est impossible de spatialiser l'intensité des pluies.

La classification des pluies moyennes annuelles selon la carte des précipitations moyennes annuelles du monde est réparties en cinq classes distinctes, à savoir :

- ✓ **Classe 1** : P_{moy} annuelles < 250 mm ;
- ✓ **Classe 2** : 250 mm < P_{moy} annuelles < 500 mm ;
- ✓ **Classe 3** : 500 mm < P_{moy} annuelles < 1000 mm ;
- ✓ **Classe 4** : 1000 mm < P_{moy} annuelles < 2000 mm ;
- ✓ **Classe 5** : P_{moy} annuelles > 2000 mm.

Cette classification a été faite à l'échelle mondiale, les pluies moyennes annuelles dans le secteur d'étude varient de 350 à 900 m. Hussein El Hage Hassan *et al.*, (2015) ont considéré qu'une pluie moyenne annuelle de 1500 mm peut favoriser une forte érosion. En se référant à ces données, on propose une discrimination à l'échelle du terrain d'étude.

A partir de la carte des pluies moyennes annuelle du bassin versant du barrage de Béni Amrane (Figure 2.8), nous avons classifié, puis codifié, les différentes plages de pluies moyennes annuelles, ce qui a permis de dresser une carte d'érosivité des pluies.

Tableau 3.2 : Classes des pluies moyennes annuelles et indices attribués

Pluies moyennes annuelles	Code
< 500 mm	1
500 – 1000 mm	2
1000 – 1500 mm	3
> 1500 mm	4

- **Interprétation de la carte de sensibilité à l'érosion selon la pluviométrie :**

Sur le terrain d'étude, seules sont représentées des précipitations faibles et moyennes. Les précipitations faibles se propagent sur une superficie de 100 Km², soit 12% de la surface totale du bassin tandis que les précipitations modérées occupent 88% de la surface totale du bassin.

3.2.3. La pente

Nous avons décrit précédemment l'influence de la topographie sur l'érosion hydrique. La carte des pentes (Figure 2.4), constitue donc un élément de base pour déterminer l'aptitude des diverses zones du bassin versant. En effet, l'estimation quantitative et qualitative du taux d'érosion dépend dans sa majeure partie de la pente puisque celle-ci contribue à la détermination des possibilités d'érosion en relation avec les trois autres facteurs.

La longueur de la pente a des effets plus incertains (Roose, 1994). Il n'en a pas été tenu compte dans cette étude.

La carte des pentes de la zone d'étude a été reclassée en se basant sur la classification de Roose (1977) et est transformée en carte de vulnérabilité à l'érosion des terrains en fonction de de la pente.

- ✓ **0-5 %** : pente faible ;
- ✓ **5-15 %** : pente moyenne ;
- ✓ **15 - 25 %** : pente forte ;

✓ **> 35 %** : pente très forte.

Pour chaque classe de pente est assigné un indice variant entre 1 et 4 (tableau. 2), 1 étant affecté aux pentes faibles (< 5°) et 4 aux pentes très fortes (>35°).

Tableau 3.3 : Classes de pente et indices attribués selon Roose (1977)

Pentes	Code
0 – 5 %	1
5 – 15 %	2
15 – 35 %	3
> 35 %	4

• **Interprétation de la carte de sensibilité à l'érosion selon la pente :**

Les quatre classes citées ci-dessus couvrent respectivement :

- 13% du terrain d'étude pour les pentes entre 0 et 5 % ;
- 32% pour celles entre 5 et 15 % ;
- 35% pour celles entre 15 et 35 % ;
- Et 20% pour celles supérieures à 35 %.

3.2.3. Occupation du sol

A partir de la carte d'occupation du sol du bassin de Béni Amrane (Figure 2.7), nous avons affecté, à chaque classe, un degré de protection contre l'érosion hydrique

- ✓ **Degré 1** : fortement protecteur.
- ✓ **Degré 2** : moyennement protecteur.
- ✓ **Degré 3** : peu protecteur.
- ✓ **Degré 4** : non protecteur.

La classification de Roose (1977) nous a servis pour dégager une classification appropriée. Roose classe les couverts végétaux en trois groupes :

- **Couvert végétal permanent**, il comprend :
 - Les forêts.
 - Reboisements.
 - Cultures pérennes.
 - Plantation viticole et arboriculture fruitière.
- **Couvert végétal temporaire**, il comprend :
 - Les cultures annuelles : Céréales, agriculture extensive et semi intensive et les terres labourables.
- **Couvert végétal absent ou incomplet**, il comprend :
 - Les pâturages : regroupent les parcours très dégradés et les moins dégradés.
 - Les sols nus : il s'agit de sols entièrement dénudés et non cultivés.

La carte d'occupation du sol établit a permis de discriminer neuf classes d'occupation du sol : 1/ grandes cultures en sec ; 2/ cultures maraichères ; 3/ cultures arboricoles ; 4/

polycultures ; 5/ oléicultures ; 6/ zone de parcours ; 7/ zone à sol nu ; 8/ forêt – maquis - reboisement ; 9/ espace bâti.

La classification est faite à l'aide d'un SIG en attribuant à chaque objet une valeur qui désigne son degré de sensibilité à l'érosion. Cette classification est basée sur l'observation directe des catégories d'utilisation des terres, a permis d'obtenir une carte de sensibilité selon l'occupation des terres. Quatre classes sont ainsi identifiées : les terrains de parcours et terrains nus, végétation très dense, végétation éparsse ou de densité moyenne et terrains cultivés.

Tableau 3.4 : Occupation des terres et indices attribués (Roose, 1977).

Occupation des terres	Indice	Affectation
Végétation très denses	1	Fortement protecteur
Végétation éparsse ou de densité moyenne	2	Moyennement protecteur
Terrains cultivés	3	Peu protecteur
Terrains nus	4	Non protecteur

Tableau 3.5 : Classes de sensibilité de couvert végétal à l'érosion selon le type d'occupation du sol de la zone d'étude

Couvert végétal	Code
Forêt dense, maquis, reboisement	1
Oléicultures et arboricultures	2
Grandes cultures en sec, polycultures, céréales, cultures maraichères	3
Sols nus, zones de parcours	4

- **Interprétation de la carte de sensibilité à l'érosion selon l'occupation du sol :**

D'après la carte obtenue (Figure 3.2 d), la répartition du couvert végétale au niveau du sous bassin versant est respectivement ; 20% des terres peu et non protecteur et 80% sont considéré comme protecteur.

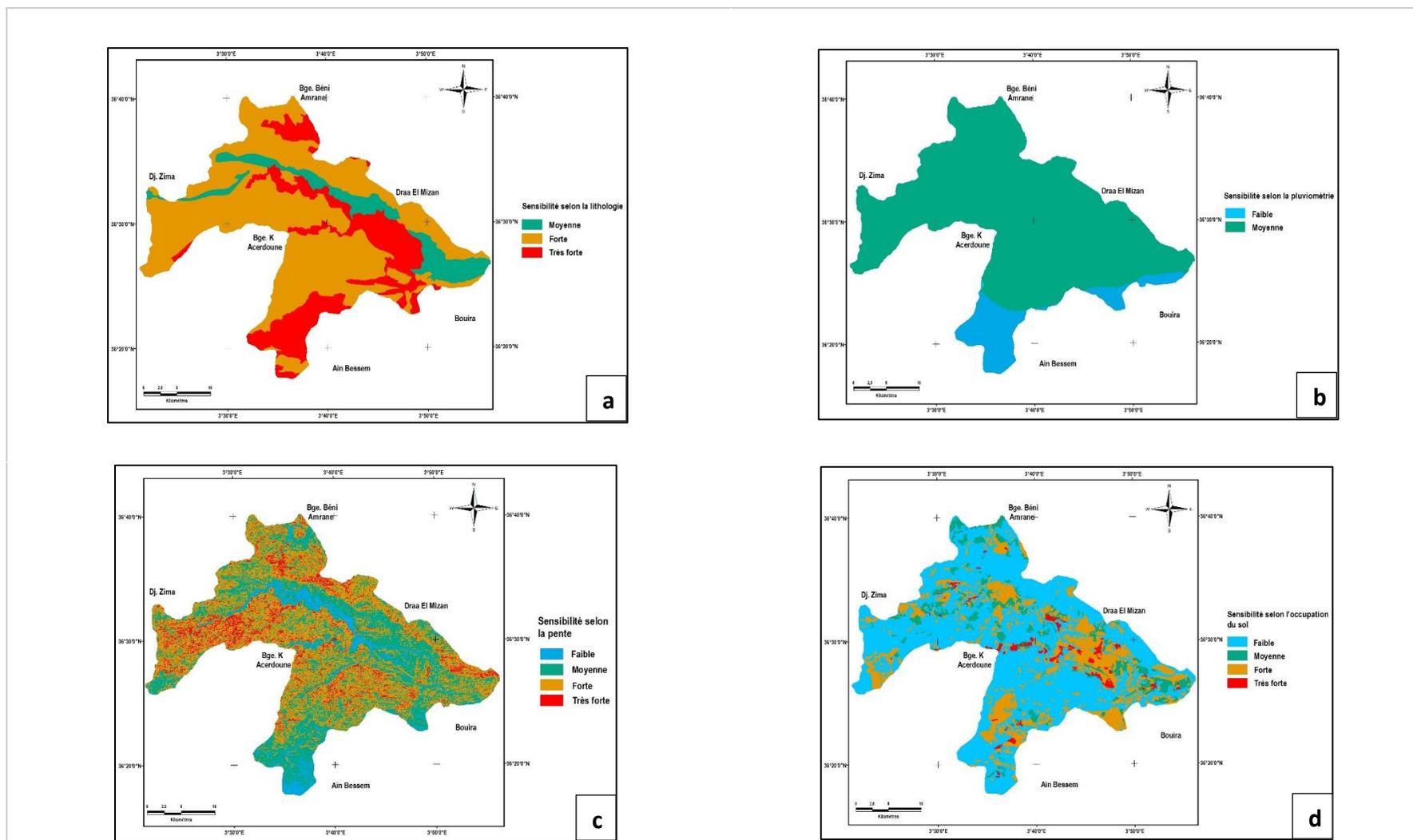


Figure 3.2 : Sensibilité des sols à l'érosion en fonction de : a) la lithologie, b) la pluviométrie, c) la pente, d) l'occupation du sol

3.3. Elaboration de la carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique

L'étude de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique suppose, comme nous l'avons précisé plus haut, la combinaison logique de plusieurs facteurs dans un SIG ; rappelons que nous nous sommes limité ici à trois facteurs externes en plus de la lithologie à la fois effet et cause.

Le problème des pondérations a fait l'objet de recherche de plusieurs chercheurs. Le rôle unanimement reconnu de la densité du couvert végétal et de la pente contre l'érosion hydrique nous a conduit à retenir des coefficients pondérateurs pour chaque facteur.

Le croisement des différentes cartes thématiques a été effectué en appliquant des coefficients de pondération inspirés des principes généraux utilisés par Le Bissonnais (Le Bissonnais *et al.*, 2004). La pondération la plus forte est attribuée au facteur « couvert végétal », considéré comme le facteur dominant, et la plus faible pondération est attribuée à la précipitation car nous ne disposons pas des intensités des pluies, mais seulement des hauteurs moyennes annuelles. Le facteur 2 est attribué à la lithologie et le facteur 3 est donné à la topographie. Les principes généraux utilisés pour la pondération des paramètres d'après Le Bissonnais *et al.* (2004) ont les suivants :

- Seuls les sols nus et les sols cultivés sont sensibles aux autres facteurs d'érosion (pente, lithologie...). Ces derniers n'ont pas d'influence sur les prairies et les forêts denses ;
- L'influence de la pente augmente quand elle est associée à un couvert végétal faible ;
- Le facteur érodibilité intervient uniquement dans le cas des pentes fortes ;
- L'effet du climat augmente avec la sensibilité à l'érosion, par exemple dans des cas de très faible sensibilité à l'érosion (par exemple sols couverts en permanence sur faible pente), l'aléa reste très faible quel que soit l'érosivité des pluies.

En procédant à l'union des tables attributaires correspondantes aux quatre cartes thématiques où des codes ont été assignés par ordre de vulnérabilité croissante à l'érosion (tableaux 3.1, 3.2, 3.3, 3.5), la carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion est établie en tenant compte de l'effet des quatre paramètres par la formule suivante :

$$I = \sum \sum P_i * S_{ij}$$

Où : I est l'indice de vulnérabilité à l'érosion hydrique

P_i représente la pondération du paramètre i (pluviométrie, lithologie, pente, végétation) ;

S_{ij} est la contribution de la classe j pour chacun des paramètres i .

Ainsi, pour les classes 1,2,3,4 qui représentent une zone à pluies moyennes annuelles inférieures à 500 mm avec des roches cohésifs fracturées affleurant sur une pente variant de 15 à 35 % à terrains nus, l'indice est de 30 ($1*1+2*2+3*3+4*4$). Quatre classes de vulnérabilité à l'érosion ont été tirées en divisant les valeurs retenues en intervalles réguliers : faible (indices 10 à 17), moyenne (indices 17 à 24), forte (indices 24 à 32) et très forte (32 à 40).

La figure ci-dessous représente la carte de sensibilité à l'érosion hydrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane avec ces quatre classes.

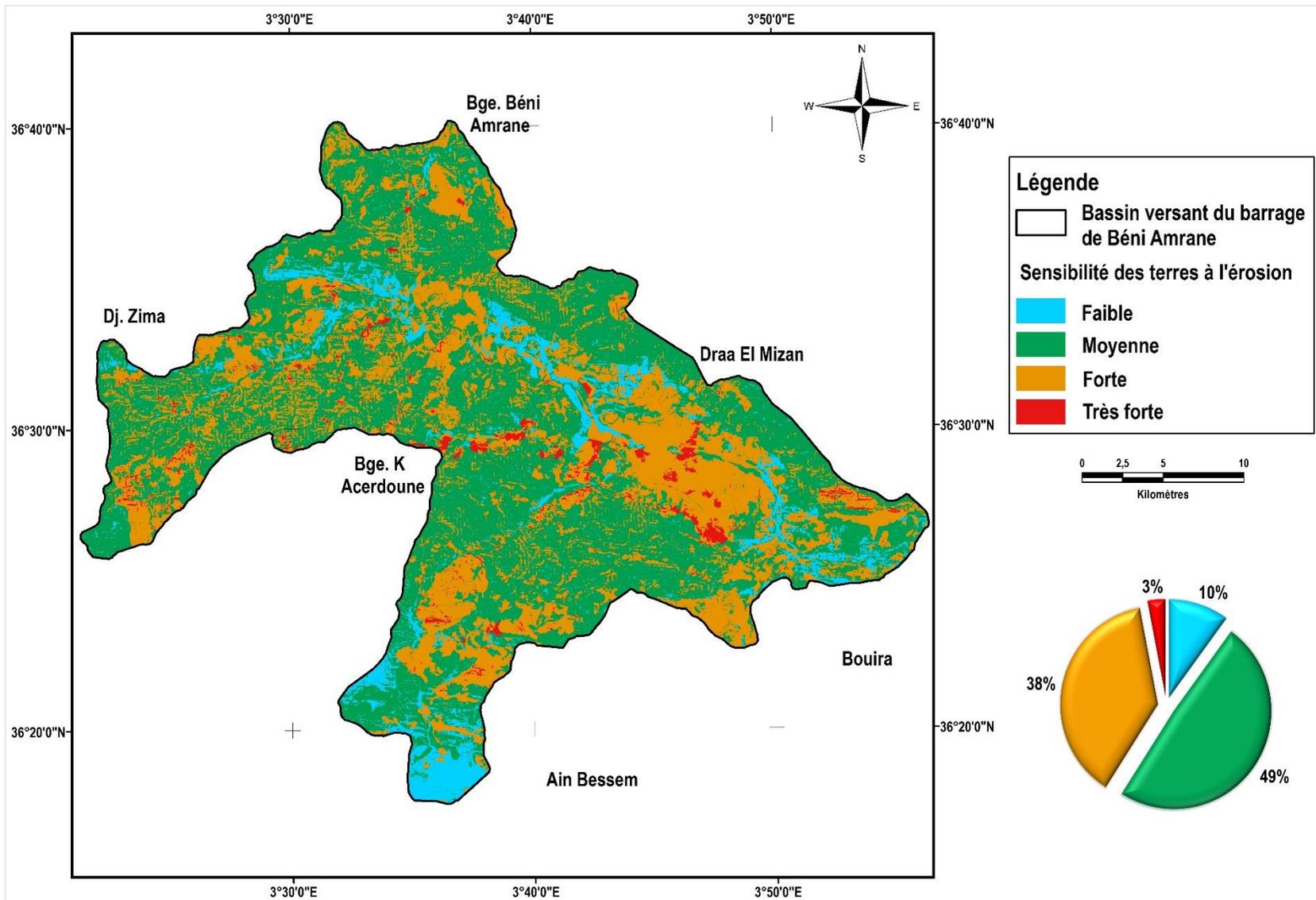


Figure 3.3 : Carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane

3.4. Résultats

Nous rappelons que la carte de sensibilité des sols à l'érosion hydrique (figure 3.3) est réalisée par le croisement des cartes de lithologie, des pluies moyennes annuelles, de pentes et d'occupation du sol.

Quatre classes apparaissent :

- **Classe 1** : sensibilité faible à l'érosion représente 10 % de la superficie totale.
- **Classe 2** : sensibilité moyenne à l'érosion représente 49 % de la superficie totale.
- **Classe 3** : sensibilité forte à l'érosion représente 38 % de la superficie totale.
- **Classe 4** : sensibilité très forte à l'érosion représente 3 % de la superficie totale.

Après une description généralisée du milieu physique de notre bassin, nous avons remarqué que les parties situées au centre du bassin et à l'Est sont vulnérables à l'érosion hydrique. Cette partie est accidentée où on rencontre des terrains à forte pente ($> 15^\circ$) et un couvert végétal de faible densité.

On note une dominance des sols à sensibilité moyenne et élevée. Ceux-ci affectent 87 % du terrain d'étude, avec une répartition quasi générale dans un large secteur. Une proportion de 38 % de la superficie du bassin est d'une sensibilité élevée à l'érosion et 3 % d'une susceptibilité très élevée. Ces zones concernent les terrains à fortes pentes, à cultures ou à couvert végétal absent ou/et à formations superficielles peu résistantes.

Les unités moyennement sensibles à l'érosion occupent 49% de la superficie totale du bassin et correspondent aux terrains à pente modérée à faible, et/ou sont occupés par un couvert végétal relativement dense, ou des sols où les pratiques culturales sont appropriées. Par contre, les classes des sols à risque très faible (9% du bassin) sont localisées principalement au niveau des arboricultures et des forêts denses, où le sol bien protégé facilite l'infiltration et limite les risques de ruissellement agressif et d'érosion, ces zones ont une pente généralement comprise entre 0 et 4 %. Les études de Roose (1991) ont montré que même sur une pente inférieure à 1 %, de l'érosion peut se produire. Il s'agit d'une érosion en nappe, sans formation de rigoles ou de ravines et les eaux de ruissellement ne parvenant pas à se concentrer.

La cartographie de la sensibilité à l'érosion hydrique au niveau du bassin versant du barrage de Béni Amrane fournit des informations sur l'importance et l'état actuel de la dégradation des sols. Elle traduit l'état d'avancement de l'érosion résultant de la prédominance des formations meubles et des roches non compactées ou fortement altérées, des pentes fortes et du ruissellement agressif. Pour affiner les résultats, il sera nécessaire d'actualiser les données, d'améliorer les méthodes combinatoires mises en œuvre et d'intégrer des paramètres complémentaires (variabilité spatiale de l'intensité des pluies, infiltrabilité des sols, sensibilité à la battance...)

3.5. Conséquences du transport solide sur l'envasement du barrage de Beni Amrane

Le barrage de Béni Amrane est un ouvrage dont la fréquence et l'intensité des crues font que les apports moyens annuels d'eau sont d'une grande importance (414.0 hm^3). Depuis la mise en eau du barrage en 1988 jusqu'au février 1995, ce dernier était déjà à moitié envasé où environ 54% de sa capacité initiale se trouve remplacée par les dépôts de sédiments (8.5 millions de m^3). Des levés bathymétriques de l'année 2000 indiquent que la cuvette est envasée

à 70%, ce qui donnerait un volume vase de 11 millions de m³. L'érosion spécifique dans le bassin de l'Oued Isser, au droit de la station de Lakhdaria, et estimée à partir de modèles régressifs permet d'évaluer le volume de vase. Ainsi, pour une érosion spécifique réelle de 1100 tonnes/km² an et pour une durée de vie du barrage T de 12 ans, l'apport en matériaux solides aboutissant dans la cuvette serait de 16.106 m³, ce qui correspond à un volume de vase égal à 12 millions de m³ qui se rapproche de celui mesuré par les levées bathymétriques qui est de 11 millions de m³ (Larfi et Remini, 2006).

Ces résultats concernent tout le bassin versant de l'Oued Isser dont la superficie est de 3615 Km². Actuellement, le taux d'envasement du barrage de Béni Amrane est diminué avec la mise en place du barrage de Koudiat Acerdoune à l'amont du barrage de Béni Amrane en 2008.

3.6. Moyens de lutte contre l'érosion et l'envasement des barrages

Pour la protection du barrage de Béni Amrane contre l'érosion, on donne les solutions ci-dessous :

- ✓ Le reboisement, la restauration des sols, l'implantation des banquettes, la création de retenues collinaires, la plantation des cultures suivant les lignes de niveau, la plantation des végétations à longue tiges dans les oueds (Achite *et al.*, 2006).
- ✓ Pour l'envasement des barrages, plusieurs dispositifs ont été mis en place pour lutter contre ce phénomène : méthodes de chasses, soutirage par courant de densité et dragage (Achite *et al.*, 2006).
- ✓ Amélioration des parcours : La protection des sols contre l'érosion ne peut se faire qu'à condition d'entretenir les plantations qui se trouvent au niveau des talwegs et des versants, au moins pendant les premières années et cela dans le but d'assurer la réussite des plantations et d'atteindre une forte densité et même de diminuer le débit solide. L'élevage étant la ressource principale pour les riverains, il est donc indispensable d'améliorer les terres de parcours tout en veillant à éviter le surpâturage (Bouchetata *et al.*, 2006).
- ✓ Pour la protection des berges, la méthode de fixation biologique est la plus efficace, mais les mesures techniques (procédures mécaniques) sont indispensables afin de réduire la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement (Bouchetata *et al.*, 2006).

Conclusion

La carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique obtenue à l'issue de ce travail, ébauche qu'il conviendra d'améliorer, pourrait constituer un premier document d'orientation en vue d'une utilisation rationnelle des sols de la zone d'étude.

Le bassin versant du barrage de Béni Amrane est sensible à l'érosion hydrique. La conjugaison des facteurs biophysiques (pentes fortes, roche tendre très érodable, sol très peu perméable) fait du bassin une zone vulnérable à l'érosion hydrique. Les résultats de l'étude de la susceptibilité à l'érosion révèlent que 41 % du bassin versant est d'une sensibilité à l'érosion élevée à très élevée. Cela aura pour principale conséquence l'envasement du barrage de Béni Amrane qui est un phénomène inévitable mais qu'on peut réduire quand même avec la mise en place des dispositifs techniques et des mesures biologiques adéquates au sein du bassin.

Conclusion générale

Au terme de ce travail réalisé sur le bassin versant du barrage de Béni Amrane, nous pouvons conclure que les caractéristiques naturelles étudiées au niveau de ce bassin font bien apparaître la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. Le processus érosif est accentué par l'intervention de plusieurs facteurs où nous nous sommes limité ici à trois facteurs externes (occupation du sol, pente, pluviométrie) en plus de la lithologie à la fois effet et cause.

La dynamique érosive au niveau de la zone d'étude est moyennement à fortement active avec un taux de 41% de la surface totale du bassin est sensible à une érosion élevée et très élevée où les impacts se font sentir à plusieurs niveaux. Ceci revient à la friabilité des terrains marneux et à la forte déclivité du bassin.

La méthode adoptée, basée sur l'intégration des données multi-sources dans un SIG, a permis une cartographie qualitative de la sensibilité des terrains à l'érosion. Le choix de la méthode a été fixé selon les données mises à notre disposition. Plusieurs informations complémentaires permettent d'affiner la carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique, l'acquisition de connaissances sur la répartition spatiale de l'intensité des pluies et sur la sensibilité à la battance seraient particulièrement intéressante. Pour aller plus loin, il conviendrait de lancer un programme de mesure des pertes de terre sur les versants et des transports solides par les cours d'eau.

Il est important de souligner l'apport des SIG dans l'évaluation quantitative et qualitative du risque d'érosion. Le SIG a permis la division de la zone d'étude selon son degré de sensibilité au phénomène à des moindres coûts et avec un degré de précision appréciable.

La détermination des zones vulnérables à l'érosion est une étape importante dans la mise en place d'une stratégie de conservation et gestion de lutte contre l'érosion des sols. Les moyens de lutte contre ce phénomène sont nombreux, il faut néanmoins choisir les plus adaptés sur terrain, les plus efficaces et les moins coûteux. Il faut donc intégrer dans le bassin des aménagements traditionnels et accorder une importance particulière aux traitements biologiques (Boughalem, 2013). Pour le barrage de Béni Amrane, il est préférable d'installer les dispositifs adéquats pour limiter son envasement.

Références bibliographiques :

Achite, M., Touaibia, B., et Ouillon, S. (2006). Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences et Perspectives. Production scientifique-Communications, 1.

Albergel, J., Collinet, J., Zante P. et Hamrouni, H. (2010). Le rôle de la forêt méditerranéenne dans la conservation de l'eau et du sol. What Science Can Tell Us, 1.5., 12p. Physio-Géo. Géographie physique et environnement, (Volume 6), 1-42.

Association canadienne de cartographie, (2017). Repéré à <http://cca-acc.org/fr/ressources/quest-ce-que-la-cartographie/>

Biko, M.B. (2012) : Utilisation d'un système d'information géographique et de l'équation universelle de perte en terre pour prédire le risque d'érosion pluviale dans une monoculture de bananier (*musa sapientum*). Université de Dschang - Ingénieur Agronome P122.

Bouchetata, A., et Bouchetata, T. (2006). Propositions d'aménagement du sous-bassin-versant de l'oued Fergoug (Algérie) fragilisé par des épisodes de sécheresse et soumis à l'érosion hydrique. Science et changements planétaires/Sécheresse, 17(3), 415-424.

Boughalem, M. (2013) : Impact des systèmes de gestion sur la vulnérabilité des sols à l'érosion : cas du bassin versant de l'Isser - Tlemcen (Algérie) (Doctoral dissertation, Université Aboubeker Belkaid de Tlemcen).

Bou Kheir, R., Girard, M. C., Shaban, A., Khawlie, M., Faour, G., et Darwich, T. (2001). Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. Télédétection, 2(2), 79-90.

Boussaid, A. (2014). Étude des hydrogrammes des crues du bassin versant Isser (09) Algérie (Boumerdès) (Mémoire de Master), 50 p.

Calvet, R. (2003). Le sol : propriétés et fonctions (Vol. 2). France Agricole Editions 511p.

Christine, C. (2017). LE FORUM SIG-POUR-TOUS. Repéré à <http://sig-pour-tous.forumactif.com>.

Dahmani, A. (2012). Contribution à l'étude de l'érosion et du ruissellement des sols rouges dans les monts de Tlemcen : Utilisation de simulation de pluies.

Délusca, K. (1998). Estimation de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'Équation universelle de perte de sol assistée d'un Système d'information géographique : le cas du bassin versant de la ravine Balan, Haïti.

Dumas, J. (1965). Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol, 3(4), 307-333.

El Hage Hassan, H., Charbel, L., et Touchart, L. (2015). Cartographie des conditions de l'érosion hydrique des sols au Mont-Liban : exemple de la région d'El Aaqouira. Physio-Géo. Géographie physique et environnement, (Volume 9), 141-156.

Larfí, B., et Remini, B. (2006). Le transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser impact sur l'envasement du barrage de Béni Amrane (Algérie). Larhyss Journal, 5, 63-73.

Latreche, B. (2014). Contribution à l'étude et à la cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique du Mont de Saida (Mémoire de Master), 85 p.

Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C., et Daroussin, J. (2002). L'érosion hydrique des sols en France. Rapport INRA, IFEN.

Le Bissonnais, Y., Dubreuil, N., Daroussin, J., et Gorce, M. (2004). Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. Etude et gestion des sols, 11, 3.

Leguédou, S. (2003). Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés (Doctoral dissertation, Université d'Orléans), 156 p.

- Medjber, A. (2011). Influence de la variabilité des précipitations sur le taux de sédimentation dans plusieurs barrages algériens. *Revue LJEE*, (19).
- Merzouk, A., Fenjiro, I., et Laouina, A. (1996). Cartographie de l'évolution des formes d'érosion dans le Rif occidental (Maroc) : étude multirate utilisant un SIG bassin versant. *Bulletin-Réseau Erosion*, (16), 444-456.
- Remmas, H. (2014). Contribution à l'étude et à la cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique du sous bassin versant de Oued Saida (Mémoire de Master), 66 p.
- Roose, E., (1973). Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Thèse Doct. Ing., Fac. SC. Abidjan, ORSTOM Abidjan, 125 p.
- Roose, E. (1980). Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granité sous culture et sous savane arbustive soudanienne du nord de la Côte d'Ivoire : Korhogo 1967-1975. ORSTROM.
- Roose, E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols, GCES : stratégie nouvelle de lutte antiérosive : outil de la gestion de terroir.
- Roose, E., et De Noni, G. (1998). Apport de la recherche à la lutte antiérosive. *Etude et Gestion des sols*, 5, 181-194.
- Sadjania, D. (2015). Cartographie des risques d'érosion pouvant impacter la qualité de l'eau de la Gimone (Mémoire de Master), 62 p.
- Souadi, Y. (2011). L'érosion hydrique au Maghreb, étude d'un cas : le bassin versant de l'oued Barbara (Tunisie septentrionale) université Québec à Montréal 124 P.
- Yjjou, M., Bouabid, R., El Hmaidi, A., Essahlaoui, A., et El Abassi, M. (2014). Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 3(8), 83-91.
- Zaher, H. (2010). Conservation des sols et de l'eau. Repéré à <http://www.ma.auf.org/erosion/index>.

